

# Osnovi elektronike

Predispitne obaveze:

U JANUARU OSTALO

Redovno pohađanje nastave (predavanja+vežbe.	10%	10%
Odbranjene laboratorijske vežbe	10%	10%
Kolokvijum I (Kasno za kajanje)	50%	20%
Kolokvijum II (21.01.2019.)	50%	20%
	<hr/>	
	120%	60%

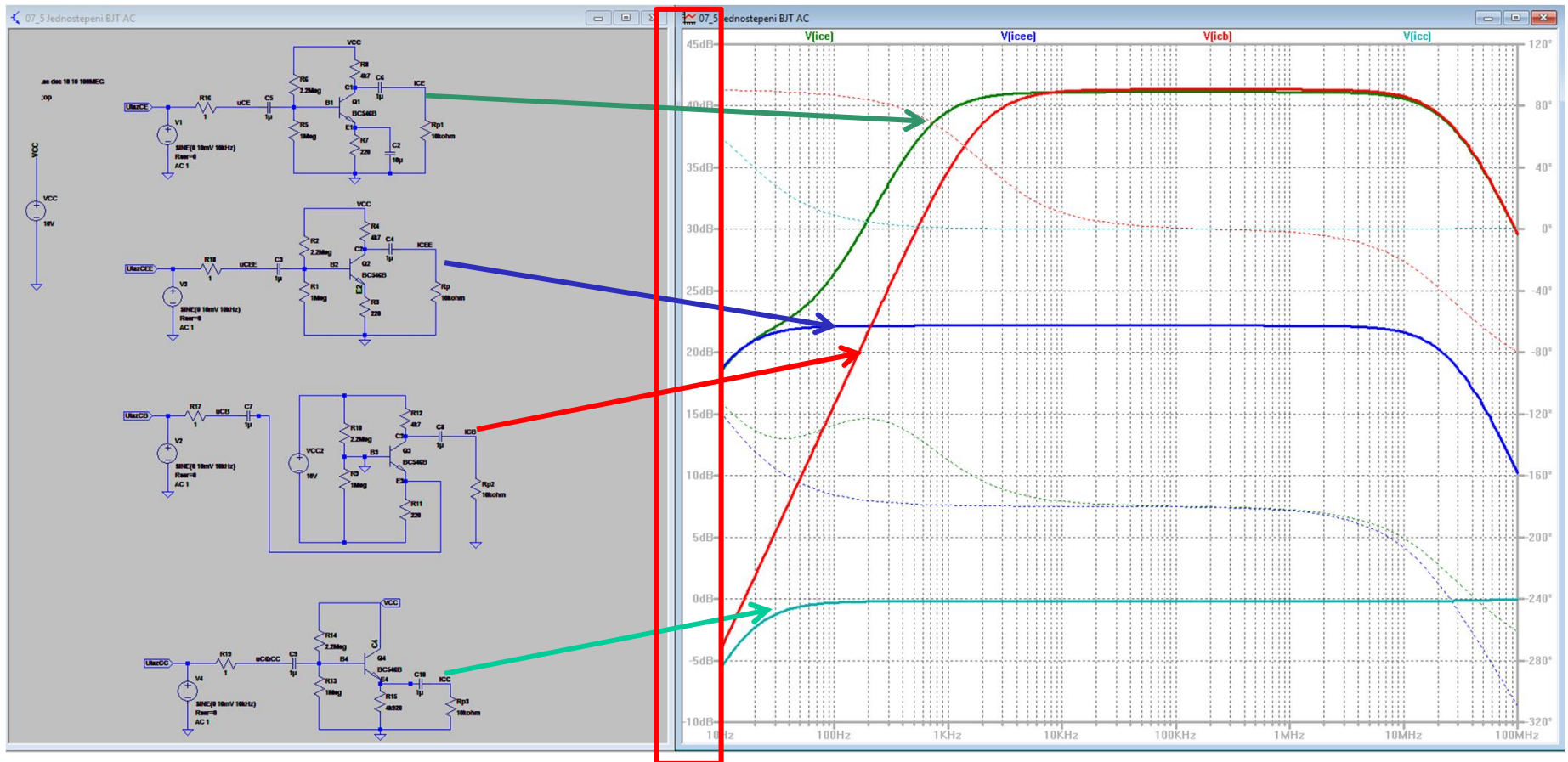


**Ukupan skor u januaru može biti  
120% PRE ISPITA**

**Savet: Izadite na kolokvijum  
MNOGO JE LAKŠE!**

# Jednostepeni pojačavači sa BJT

Da se podsetimo:  $R_{gen}=1\Omega$ ,  $R_p=10k\Omega$

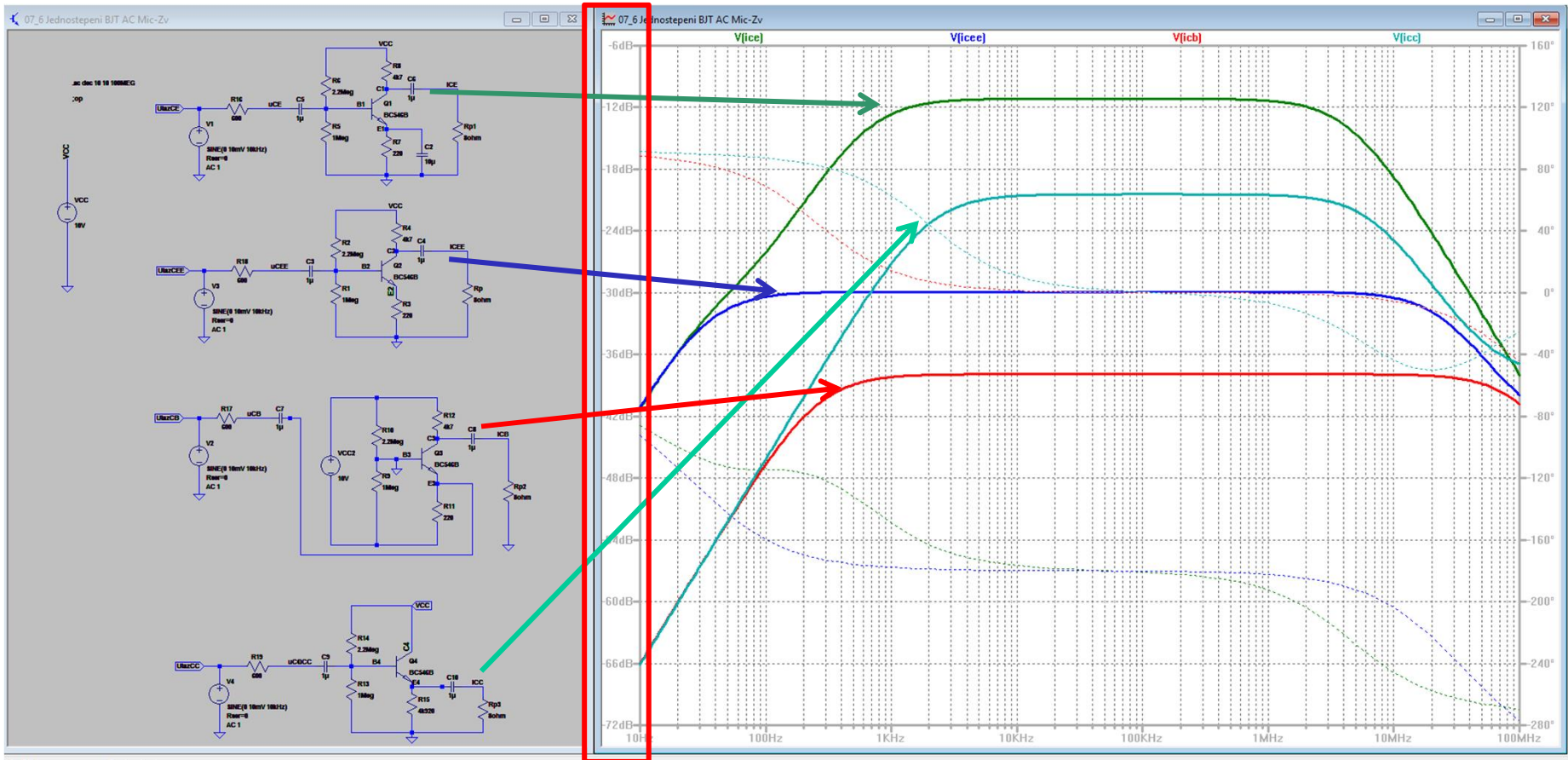


20. novembar 2018.

Jednostepeni pojačavači sa BJT

# Jednostepeni pojačavači sa BJT

Da se podsetimo:  $R_{gen}=600\Omega$ ,  $R_p=8\Omega$



20. novembar 2018.

Jednostepeni pojačavači sa BJT

## Da se podsetimo

---

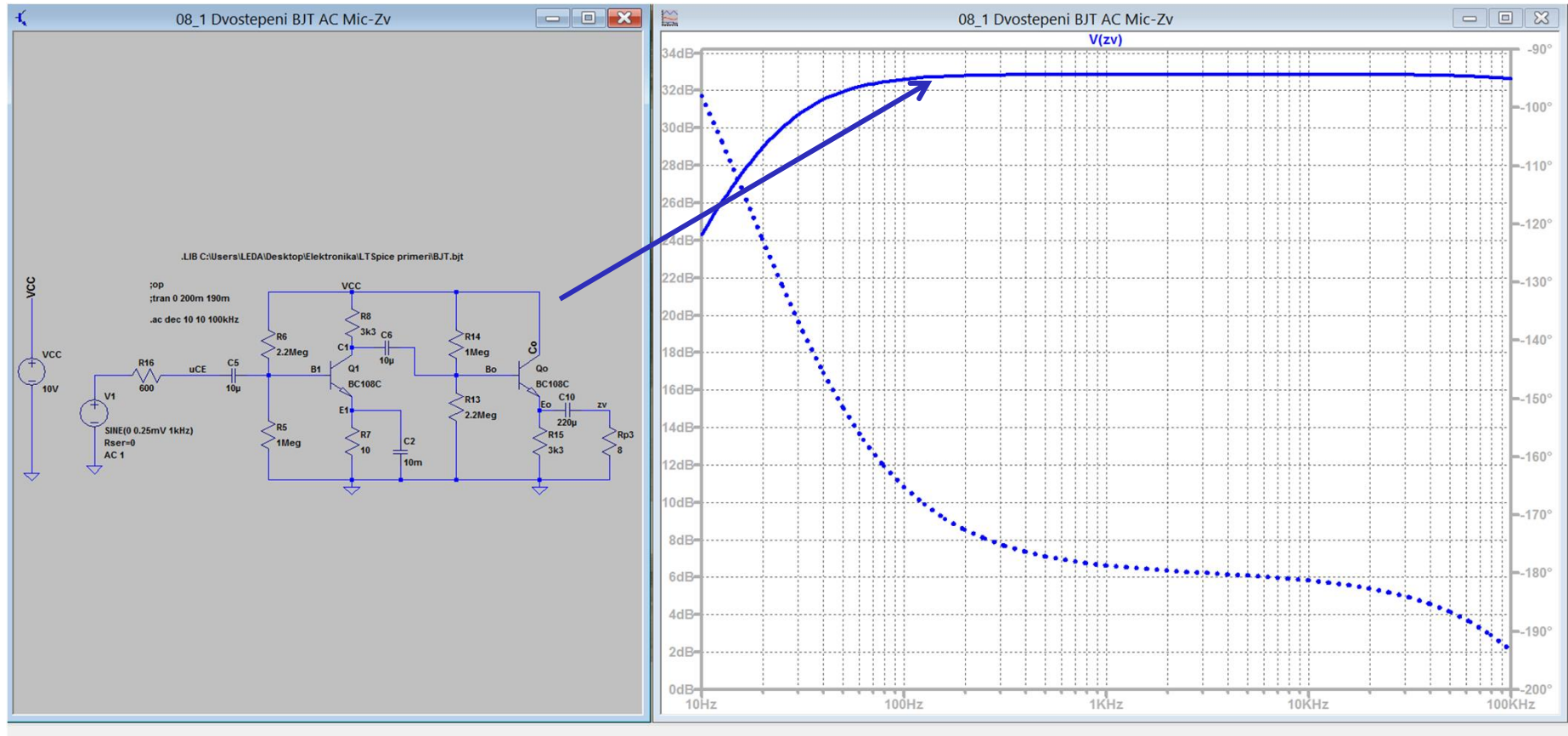


1. Zašto?
2. Šta će se desiti kada ih vežemo?



## Jednostepeni pojačavači sa BJT

Da se podsetimo:  $R_{gen}=600\Omega$ ,  $R_p=8\Omega$



20. novembar 2018.

Jednostepeni pojačavači sa BJT

## Da se podsetimo



1. Zašto?

2. Šta će se desiti kada ih vežemo?

Ali pre toga...

Da li i kako mogu da se poboljšaju osobine?

# Diferencijalni pojačavači

## Sadržaj

---

- 1. Zašto?**
- 2. Princip rada**
- 3. Osobine**
- 4. Realizacija sa MOS**
- 5. Realizacija sa BJT**

## Zašto diferencijalni ?

---

**Naziv „diferencijalni“ šta znači?**



**Pojačavaju razliku signala.**

**Zašto razliku, a ne zbir? - diferencijalni**



**- poništavanje smetnji**

**Uz to:**

**- mala temperaturska osetljivost, mali temperaturski drift**

**- relativno veliko pojačanje**

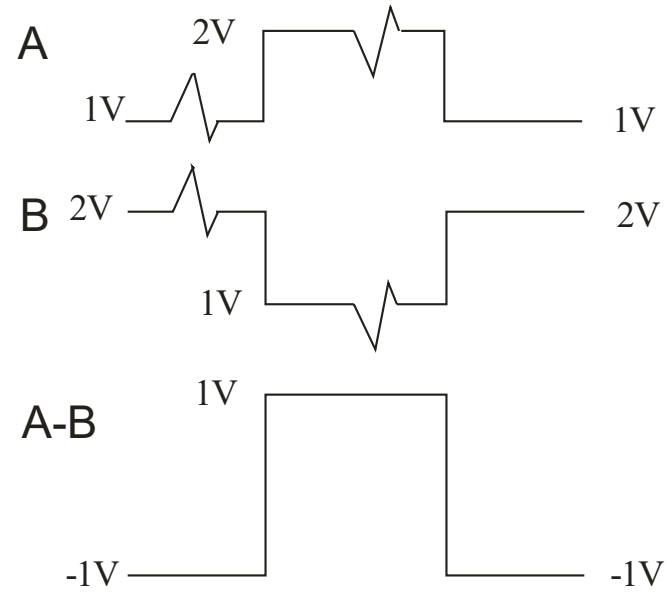
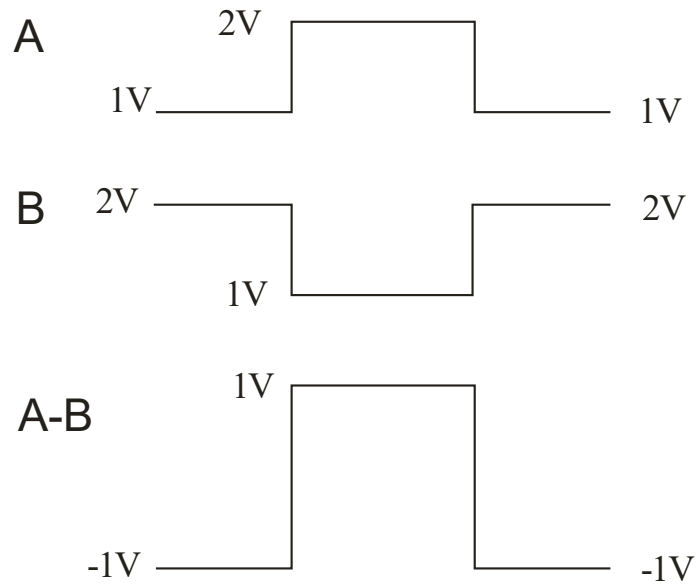
**- laka realizacija u IC**



## Zašto diferencijalni ?

---

### Poništavanje smetnji:



### Želja:

- **Što veće pojačanje razlike ulaznih signala.**
  - Što manje pojačanje srednje vrednosti ulaznih signala.
- **Što veća ulazna otpornost.**
- **Što manja izlazna otpornost.**

**Kako ispuniti ovu želju?**



## Osobine

---



**Pretpostavke:**

**Ako se pojačava razlika signala, mora da postoje dva ulaza**

**Raspolažemo sa jednostepenim pojačavačima – moguće je sklopiti dva pojačavača u jedan.**

**Jedan da obrće a drugi da ne obrće fazu!?**



**ZG i ZS? Imaju isto naponsko pojačanje?**

**Šta je sa ulaznim otponostima?**

## Osobine

---

**Realizacija:**



**Nije dobro ZS i ZG zbog ulazne otpornosti**

**Da budu oba ZS?**



**Može ako se pobuđuju signalima suprotnih faza.**

**Šta bi se time dobilo?**



**Solidno pojačanje razlike ulaznih signala napona.**

**Relativno velika ulazna, koja može da se poveća sa  $R_S$**

**ali i izlazna otpornost.**

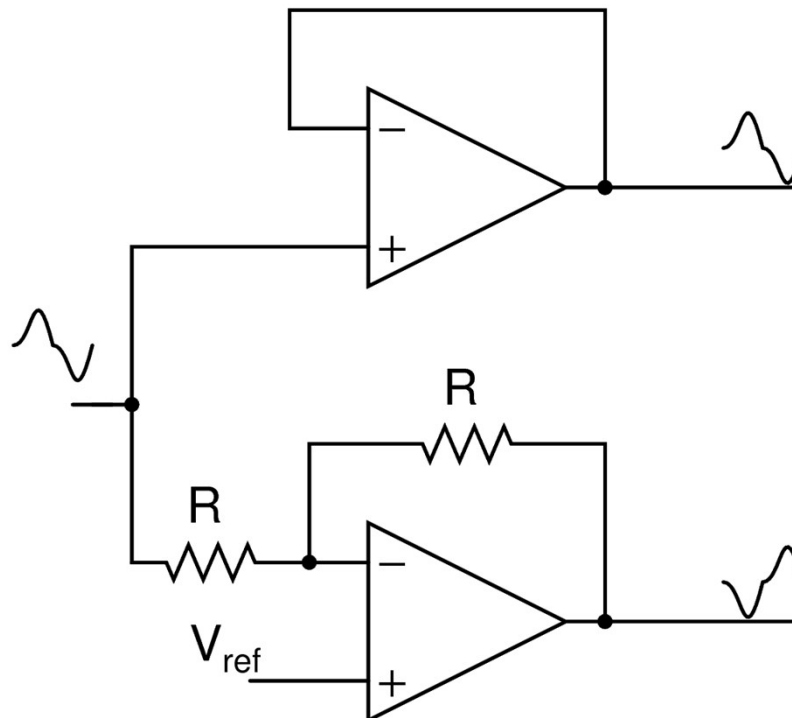
## Kako diferencijalni signal ?

---

Može ako se pobuđuju signalima suprotnih faza. 

Kako napraviti diferencijalni signal?

Kombinovanjem invertorskog i neinvertorskog pojačavača





## Realizacija diferencijalnog pojačavača

---

**Dva sa ZS (ZE).**

**Biramo najbolje rešenje:**



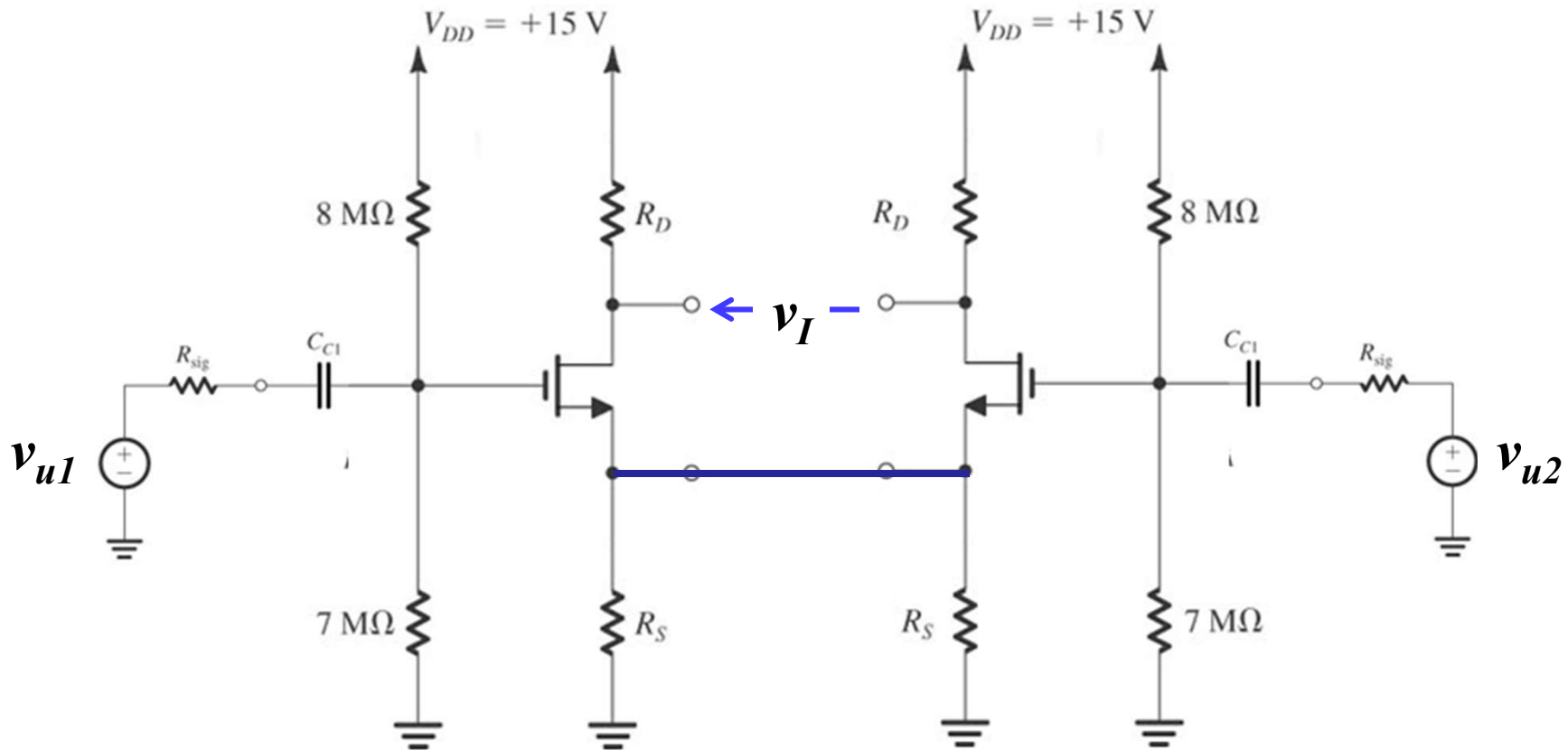
**Zbog stabilnosti – otpornost u sorsu (emitoru).**

**Zbog pojačanja što veća dinamička otpornost u  
drejnu/kolektoru.**

**Zbog ulazne otpornosti što veća dinamička otpornost u  
sorsu/emitoru.**

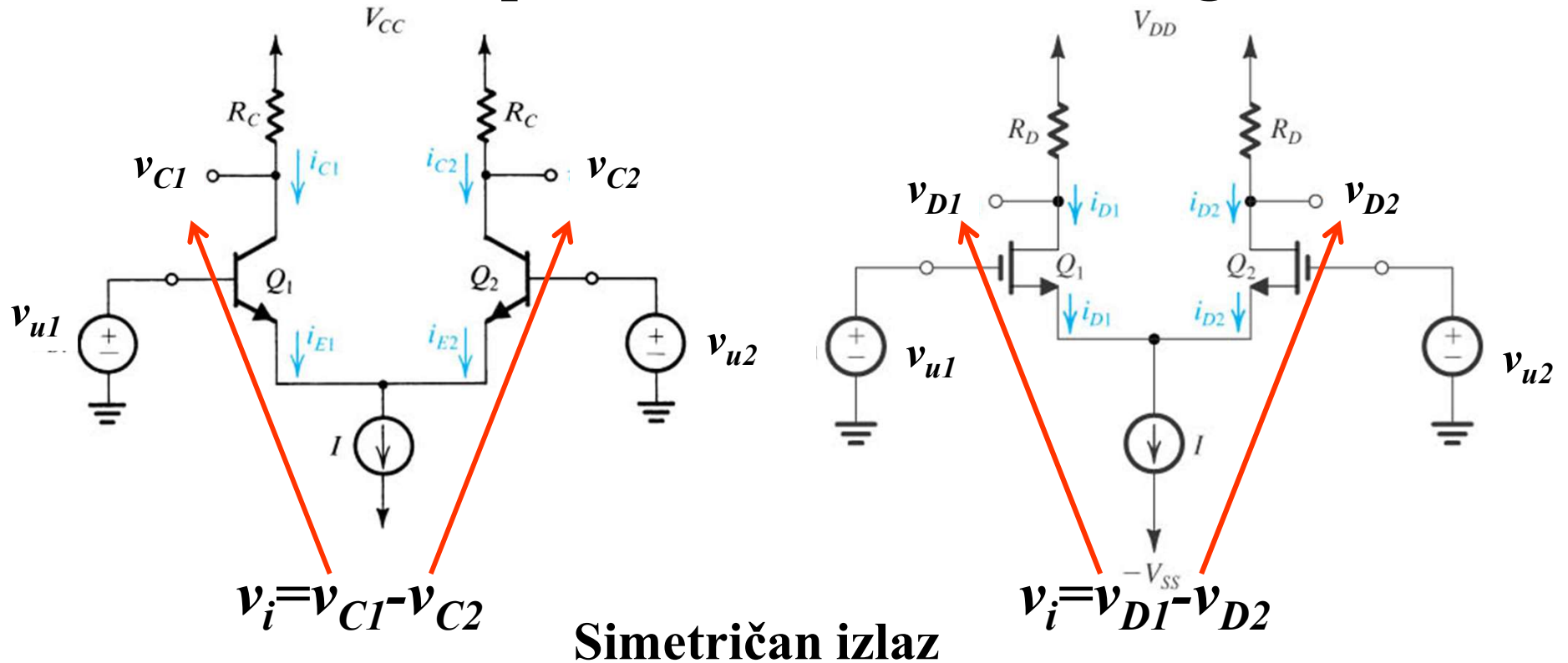
## Princip rada

Realizacija: Dva ZE (ZS) stepena sa E (S) vezanim za isti čvor pobuđena invertovanim signalima  $v_{u1} = -v_{u2} = v_u/2$



## Princip rada

**Realizacija: Dva ZE (ZS) stepena sa E (S) vezanim za isti čvor pobuđena invertovanim signalima**



## Osobine

---

**Osobine diferencijalnih pojačavača:**

**Solidno pojačanje razlike ulaznih signala (kao ZS/ZE).**

**Malo pojačanje srednje vrednosti ulaznih signala  
(veliko potiskivanje srednje vrednosti).**

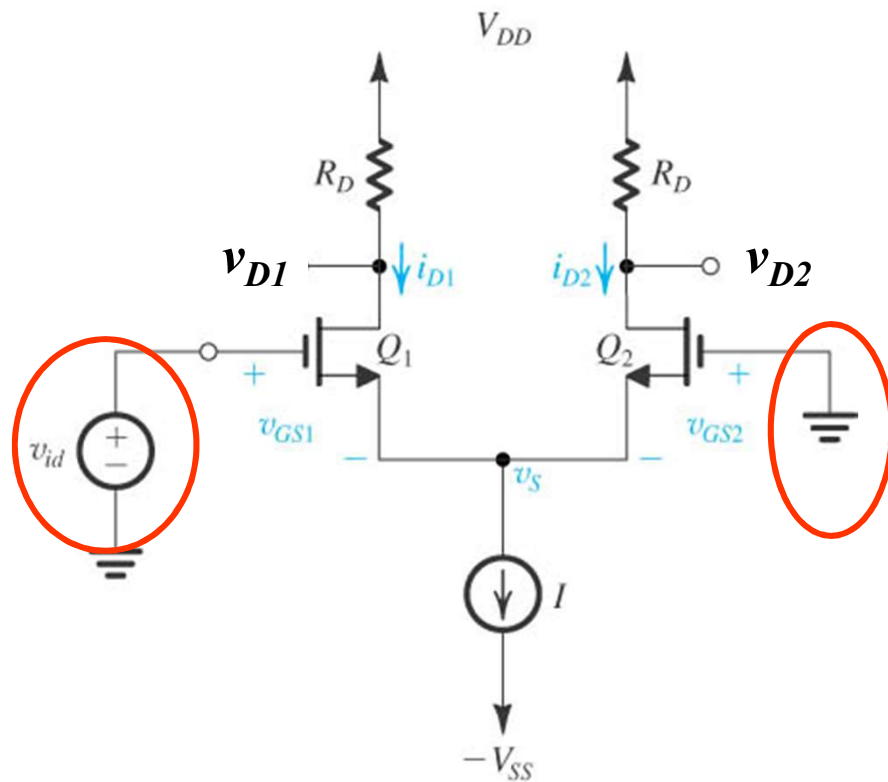
**Veća ulazna otpornost nego ZS/ZE.**

**Veća izlazna otpornost nego ZS/ZE.**

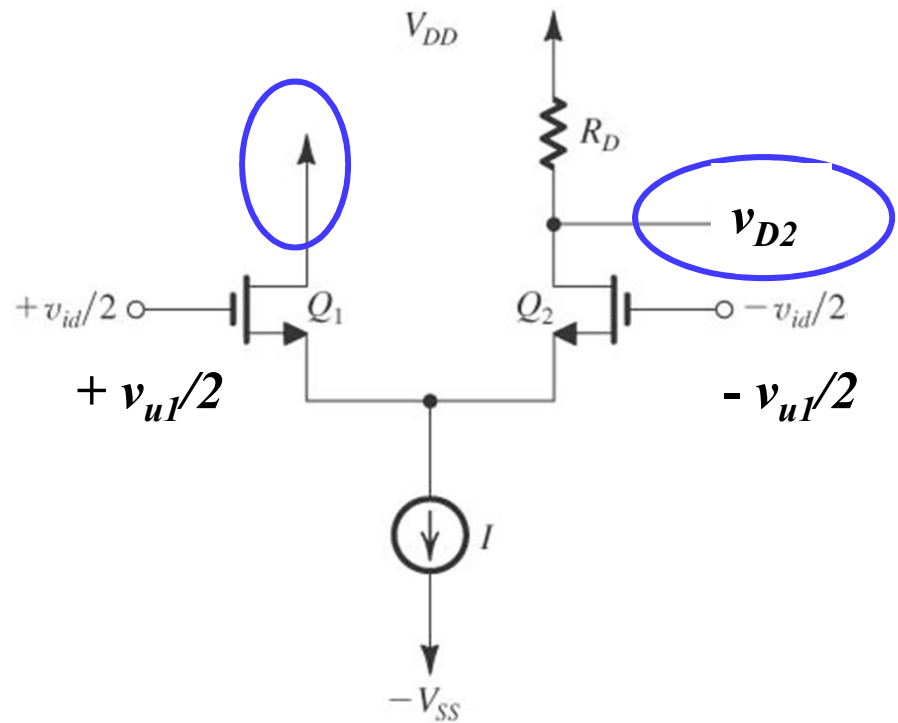
## Princip rada

### Moguće kombinacije:

#### Asimetrični ulaz



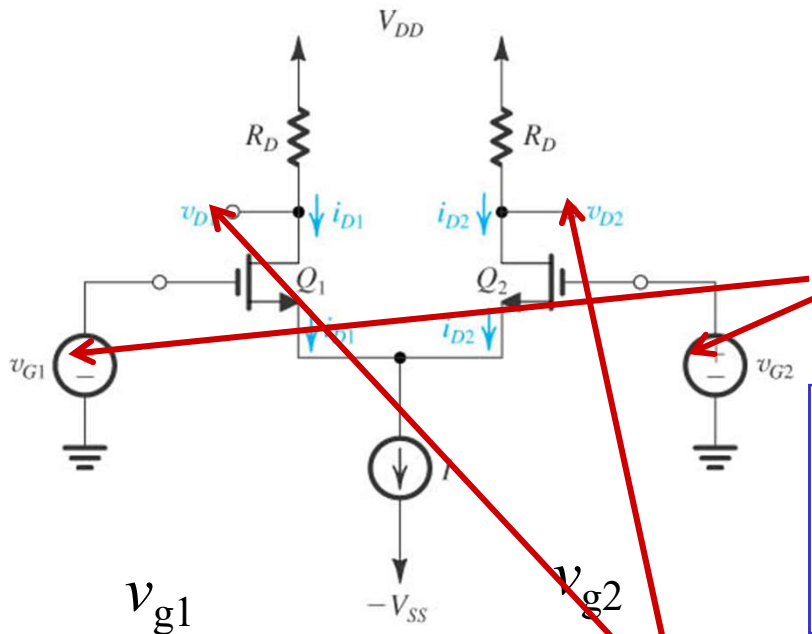
#### Asimetrični izlaz





## Realizacija sa MOST

### Primer MOS pojačavač:



Dva simetrična ulaza

Dva simetrična izlaza

Ulazni signali:

Korisni: signal razlike (diferencijalni)

$$v_{UD} = v_{G1} - v_{G2} = V_G + v_{g1} - (V_G + v_{g2})$$

$$v_{UD} = v_{ud} = v_{g1} - v_{g2}$$

Korisni: signal razlike na izlazu (diferencijalni)

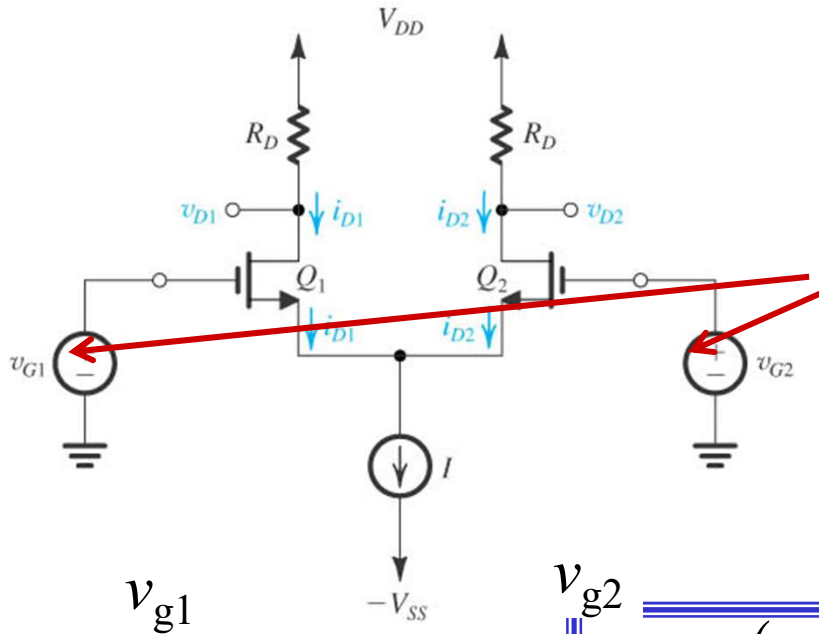
$$v_{ID} = v_{D1} - v_{D2} = V_{D1} - R_D (g_m v_{g1}) - (V_{D2} - R_D (g_m v_{g2}))$$

$$V_{D1} = (V_{DD} - R_D \frac{I}{2}) = V_{D2}$$

$$v_{ID} = -R_D g_m (v_{g1} - v_{g2}) = -R_D g_m v_{UD}$$

## Realizacija sa MOST

### Primer MOS pojačavač:



Neželjeni: zajednički napon na oba ulaza - signal srednje vrednosti

$$v_{US} = (v_{G1} + v_{G2}) / 2 = (V_G + v_{g1} + (V_G + v_{g2})) / 2$$

$$v_{US} = V_G + \frac{(v_{g1} + v_{g2})}{2} \equiv v_{UCM} \equiv v_{UC}$$

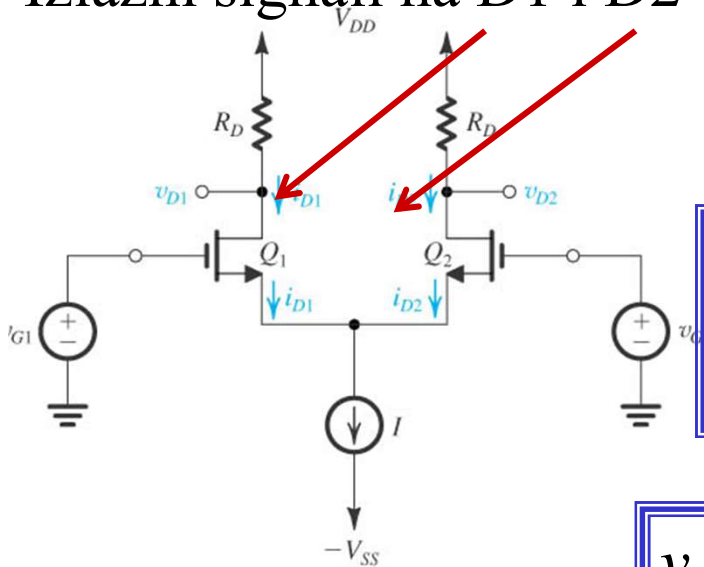
Za  $v_{g1} = -v_{g2}$  je  $v_{d1} = -v_{d2}$

27. novembar 2018.

$$v_{US} = V_G + \frac{(v_{g1} + v_{g2})}{2} = V_{US} \equiv V_{UCM} \equiv V_{UC} = V_G$$

## Realizacija sa MOST

Izlazni signali na D1 i D2



Za identične tranzistore i  $R_{D1}=R_{D2}$

$$V_{D1}=V_{D2}=V_D$$

$$v_{ID} = v_{D1} - v_{D2} = V_{D1} + v_{d1} - (V_{D2} + v_{d2})$$

$$v_{ID} = (V_{D1} - V_{D2}) + (v_{d1} - v_{d2}) = v_{d1} - v_{d2} = v_{id}$$

0

$$v_{IS} = (v_{D1} + v_{D2}) / 2 = (V_{D1} + v_{d1} + (V_{D2} + v_{d2})) / 2$$

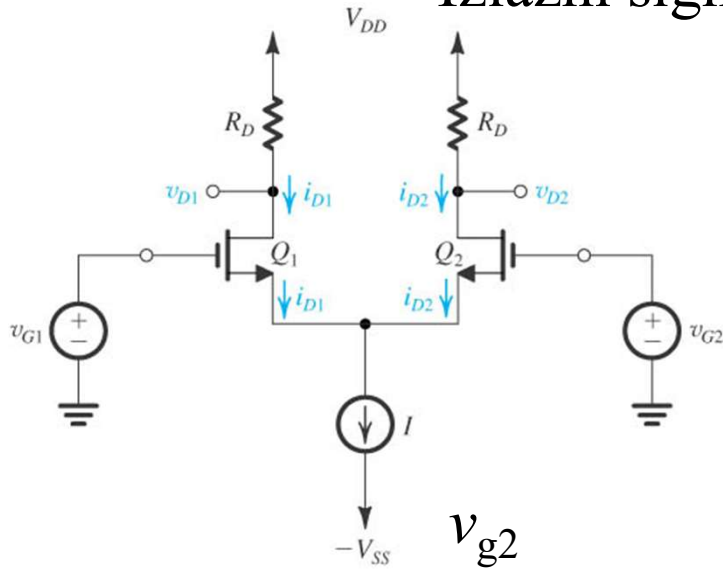
$$v_{IS} = V_D + \frac{(v_{d1} + v_{d2})}{2} \equiv v_{ICM} \equiv v_{IC}$$

Za  $v_{g1}=-v_{g2}$ ,  $R_{D1}=R_{D2}$  i identične tranzistore je  $v_{d1}=-v_{d2}$

$$v_{ICM} = V_{ICM} = V_D$$

## Realizacija sa MOST

Izlazni signali na D1 i D2, diferencijalni izlaz



$$A_d = \frac{v_{id}}{v_{ud}} = \frac{v_{d1} - v_{d2}}{v_{g1} - v_{g2}}$$

$$A_c = \frac{v_{id}}{v_{uc}} = \frac{v_{d1} - v_{d2}}{V_{CM}} \rightarrow 0$$

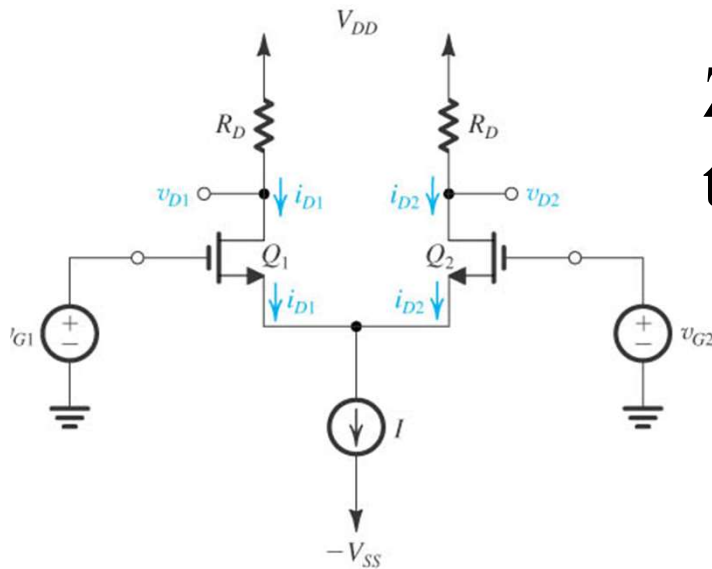
**Faktor potiskivanja srednje vrednosti**

**CMRR (Common Mode Rejection Ratio):**

$$\rho = \left| \frac{A_d}{A_c} \right|$$

**Pokazuje koliko puta je pojačanje razlike veće od pojačanja srednje vrednosti**

## Realizacija sa MOST



Za  $R_{D1}=R_{D2}=R_D$  i identične tranzistore:

$$A_d = -\frac{g_m r_o R_D}{r_o + R_D} \approx -g_m R_D$$

$$\begin{pmatrix} g_m \equiv S \\ r_o \equiv R_i \\ g_m r_o \equiv \mu \end{pmatrix}$$

$$A_d = -\frac{\mu R_D}{R_i + R_D} \approx -S R_D, \text{ za } R_i \gg R_D$$

**diferencijalno pojačanje jednako pojačanju ZS (razmisliti o nivoima napona na svakom ulazu, svakom izlazu, diferencijalnom UL i dif. IZ naponu)**

Videti šestu nedelju predavanja „Jednostepeni MOSFET pojačavaci“.

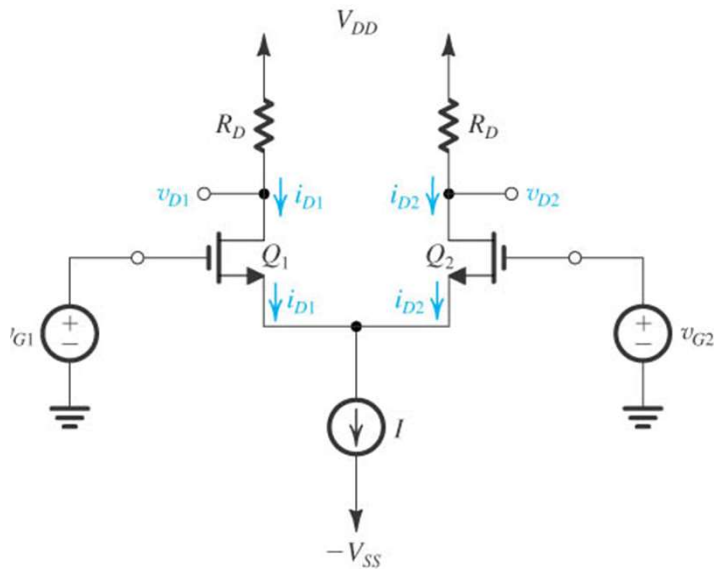
27. novembar 2018.

Višestepeni pojačavači



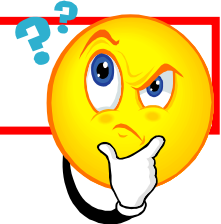
## Realizacija sa MOST

Za  $R_{D1}=R_{D2}=R_D$  i identične tranzistore:



CMRR veće za veće  $R_S$

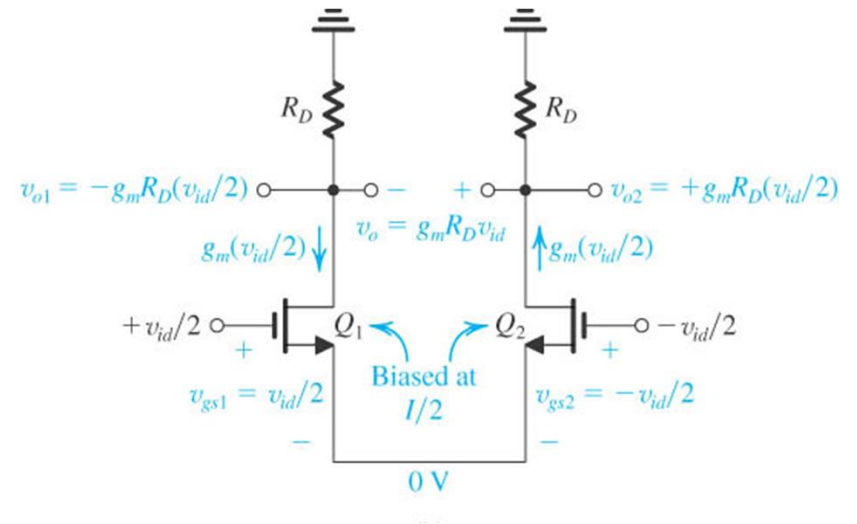
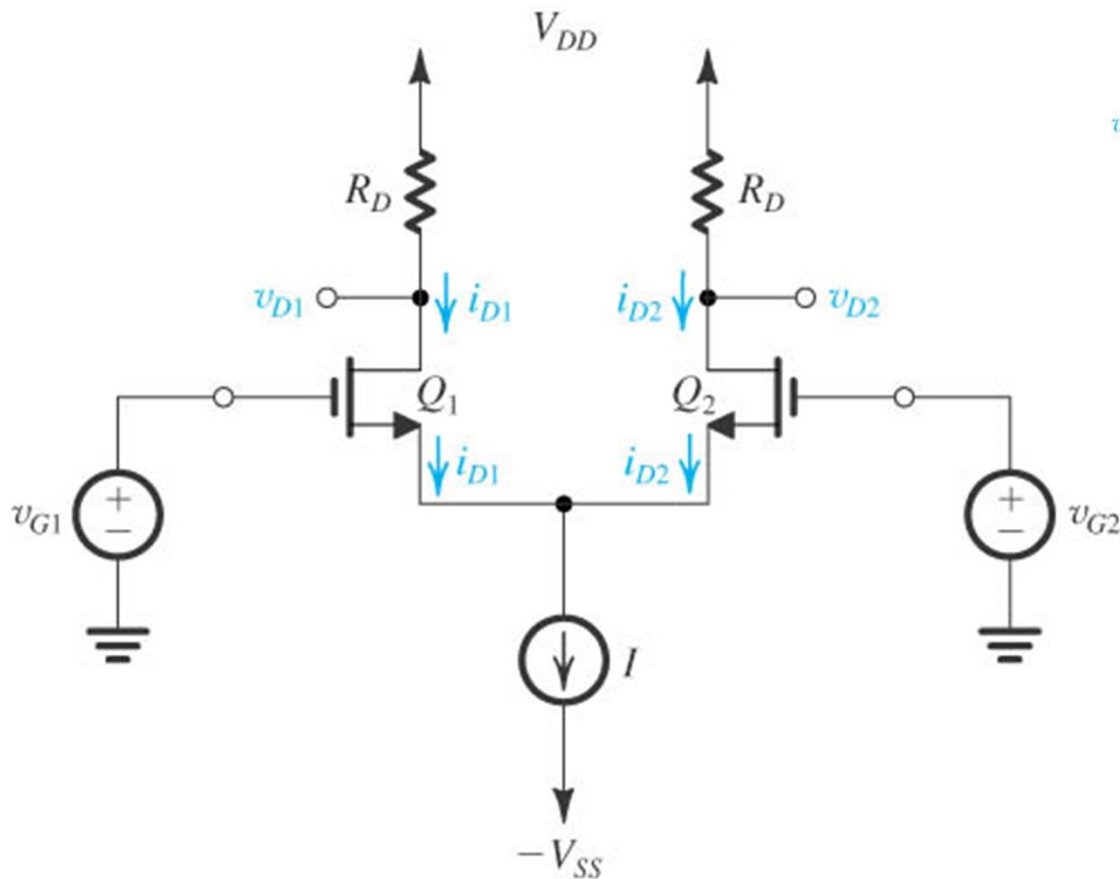
Zato?



izvor konstantne struje umesto  $R_S$ .

## Realizacija sa MOST

izvor konstantne struje umesto  $R_0$ .



Za simetrični izlaz

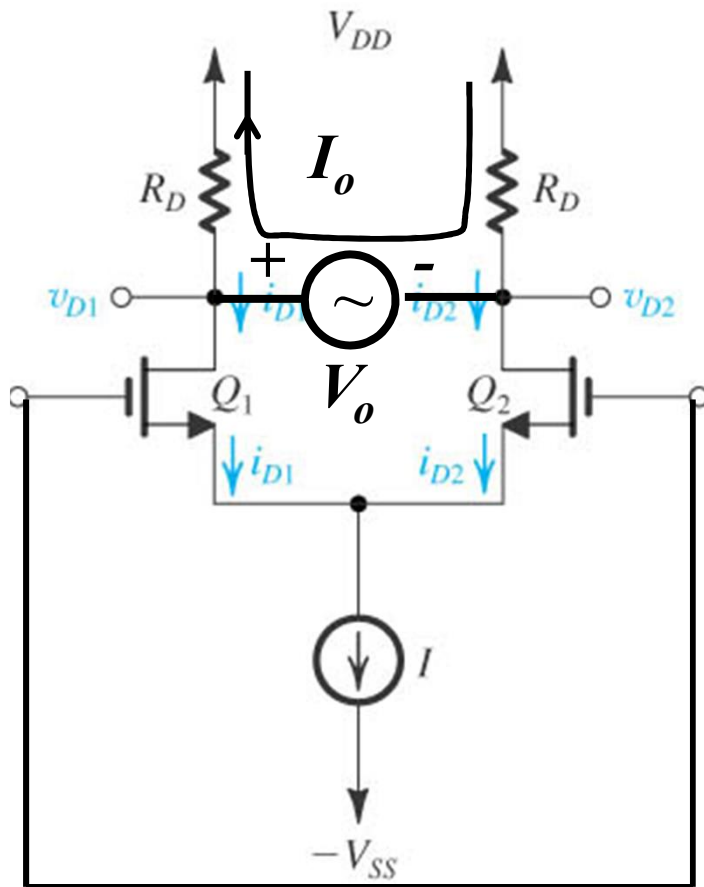
$$A_c = 0.$$

$$A_d = -g_m R_D.$$

$$\rho \rightarrow \infty$$

## Realizacija sa MOST

izvor konstantne struje umesto  $R_0$ .



Izlazna otpornost

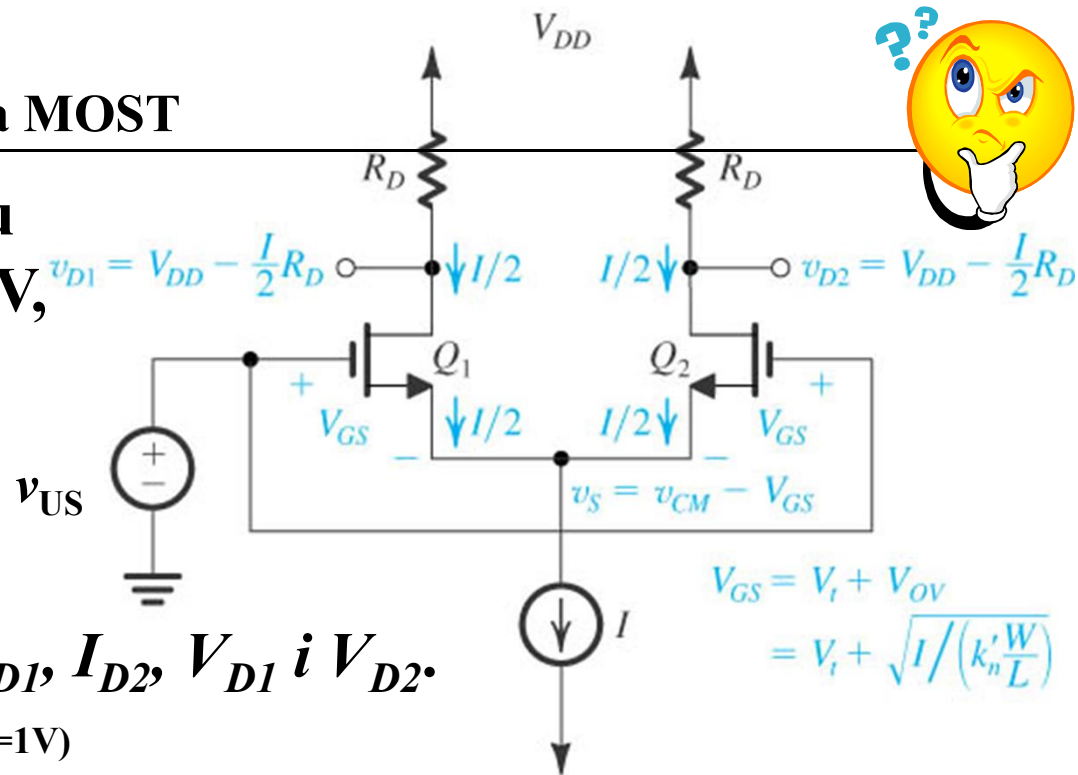
$$R_i = \frac{V_o}{I_o} = R_{D1} + R_{D2} = 2R_D$$

Dva puta veća nego kod pojačavača sa ZS!!!

## Domaći 8.1: Realizacija sa MOST

U kolu sa slike upotrebljeni su identični tranzistori sa  $V_t=0.5\text{V}$ ,  $\mu_n C_{ox}'W/L=2A=4\text{mA/V}^2$ ,  $\lambda=0$ .

Poznato je  $I=0.4\text{mA}$ ,  $V_{DD}=V_{SS}=1.5\text{V}$  i  $R_D=2.5\text{k}\Omega$ .



a) Za  $V_{US}=0\text{V}$  odrediti  $V_S$ ,  $I_{D1}$ ,  $I_{D2}$ ,  $V_{D1}$  i  $V_{D2}$ .

$$(V_S=-0.82\text{V}, I_{D1}=I_{D2}=0.2\text{mA}, V_{D1}=V_{D2}=1\text{V})$$

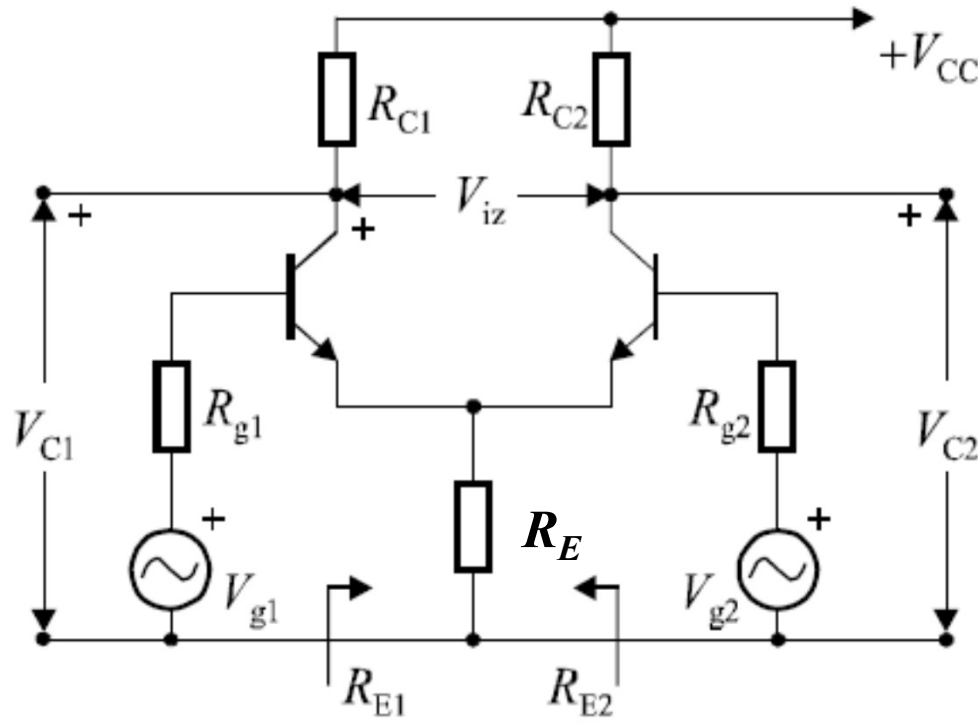
b) Ponoviti postupak pod a) za  $V_{US}=-0.2\text{V}$ . ( $V_S=-1.02\text{V}$ ,  $I_{D1}^S=I_{D2}^S=0.2\text{mA}$ ,  $V_{D1}=V_{D2}=1\text{V}$ )

c) Ponoviti postupak pod a) za  $V_{US}=0.9\text{V}$ . ( $V_S=0.08\text{V}$ ,  $I_{D1}=I_{D2}=0.2\text{mA}$ ,  $V_{D1}=V_{D2}=1\text{V}$ )

d) Koliko iznosi najveći napon  $V_{US}$  pri kome je  $I=0.4\text{mA}$ , a tranzistori rade u oblasti zasićenja? ( $V_{USmax}=1.5\text{V}$ )

e) Odrediti  $A_d$ ,  $A_c$  i  $CMMR$ . ( $g_m=1.25\text{mA/V}$ ,  $A_d=-3.125\text{V/V}$ ,  $A_c=0$ ,  $CMMR \rightarrow \infty$ )

**Primer BJT pojačavač:**



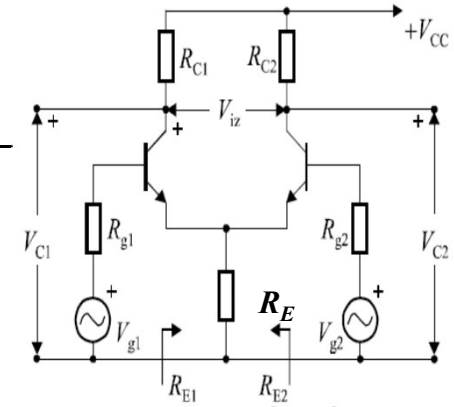
Za one koji žele  
da nauče više

Realizacija sa BJT

Za potpuno simetrično kolo sa velikim  
 $R_E$  (izvor konstantne struje).

Za  $h_{12E} = 0$  i  $h_{22E} = 0$ .

Smatra se da su  $R_{g1} = R_{g2} = 0$ .



$$A_{cd} = A_{dc} = 0$$

$$A_d = -\frac{h_{21E}}{h_{11E}} R_C = -g_m R_C$$

$$A_c = -\frac{h_{21E} R_C}{2R_E h_{11E} (1 + h_{21E} + \frac{h_{11E}}{2R_E})}$$

$$\approx -\frac{R_C}{2R_E} \text{ Pojačanje sa ZE}$$

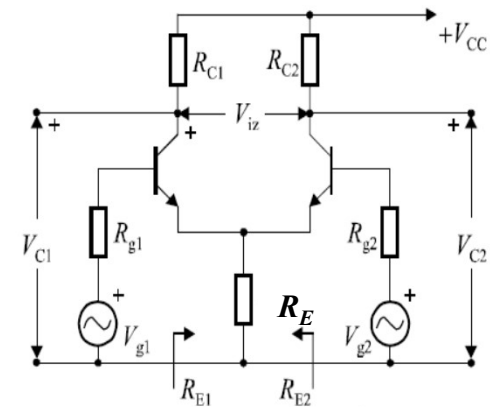
pojačanje srednje vrednosti jednako pojačanju ZE sa  
otpornikom  $2R_0$  u emitoru (degeneracija u emitoru).

## Realizacija sa BJT

Za one koji žele  
da nauče više

$$\rho = \frac{2R_E}{h_{11E}} \left( 1 + h_{21E} + \frac{h_{11E}}{2R_E} \right)$$

$$\rho = 1 + \frac{2R_E}{h_{11E}} (1 + h_{21E}) \approx 2g_m R_E$$

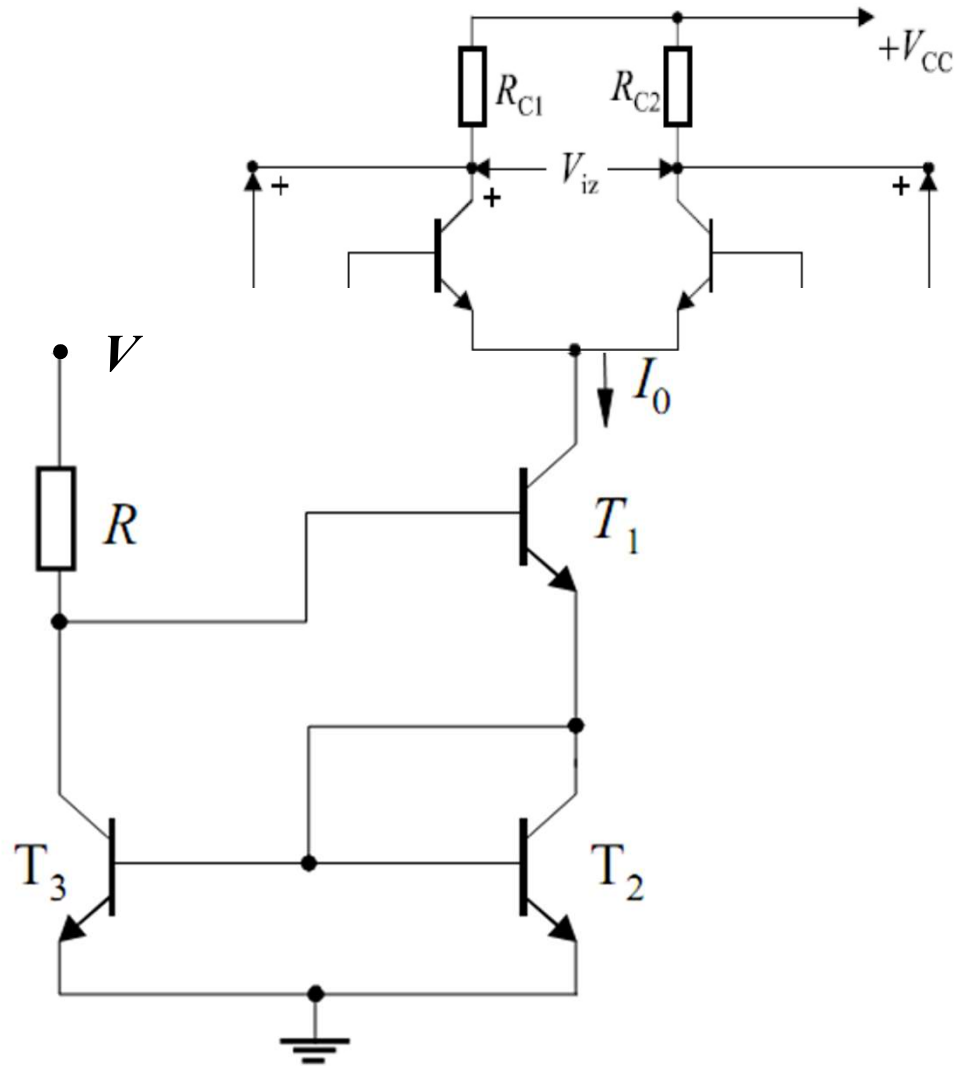


Za tipične vrednosti  $h$ -parametara kao što su  $h_{11E}=2 \text{ k}\Omega$   $h_{21E}=150$  i  $h_{22E}=1/R_0=25 \text{ }\mu\text{A/V}$ , dobija se  $\rho = 6000$ .

Faktor potiskivanja ne zavisi od  $R_C$  nego od  $R_E$ .

Manja  $I_c$  ili bolji strujni izvor (Wilsonov)  $\rightarrow$  veće  $R_E$ .

**Wilsonov strujni izvor - veće  $R_E$ .**

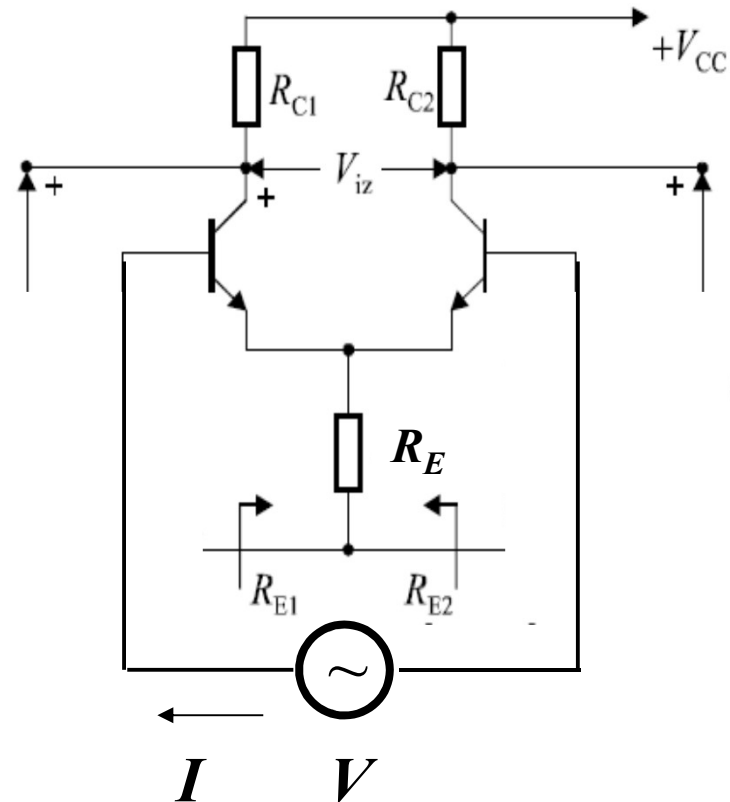




## Ulazna otpornost

$$R_u = \frac{V}{I} = 2h_{11E}$$

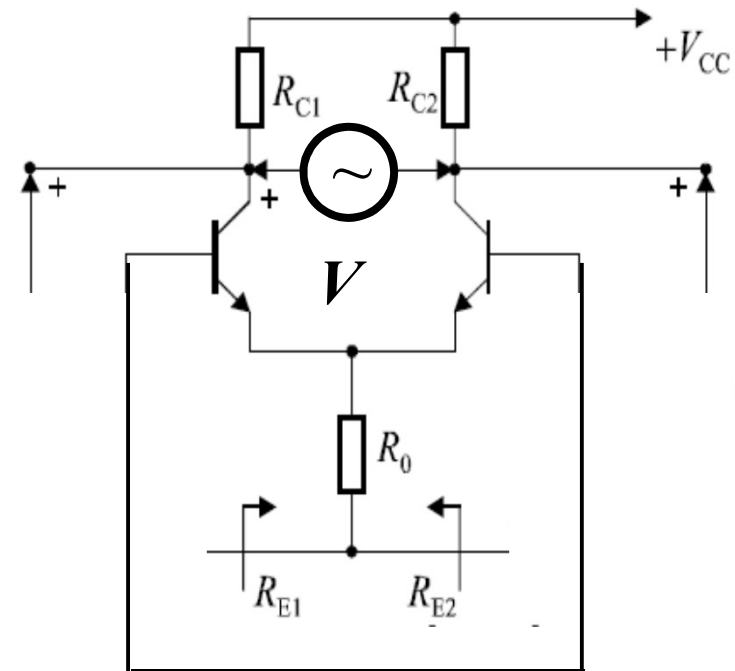
2x veća nego kod ZE



## Izlazna otpornost

$$R_i = \frac{V}{I} = R_{C1} + R_{C2}$$

**Za  $R_{C1}=R_{C2}$   
2x veća nego kod ZE**



Za one koji žele  
da nauče više



izacija sa MOS

## Domaći 8.2 :

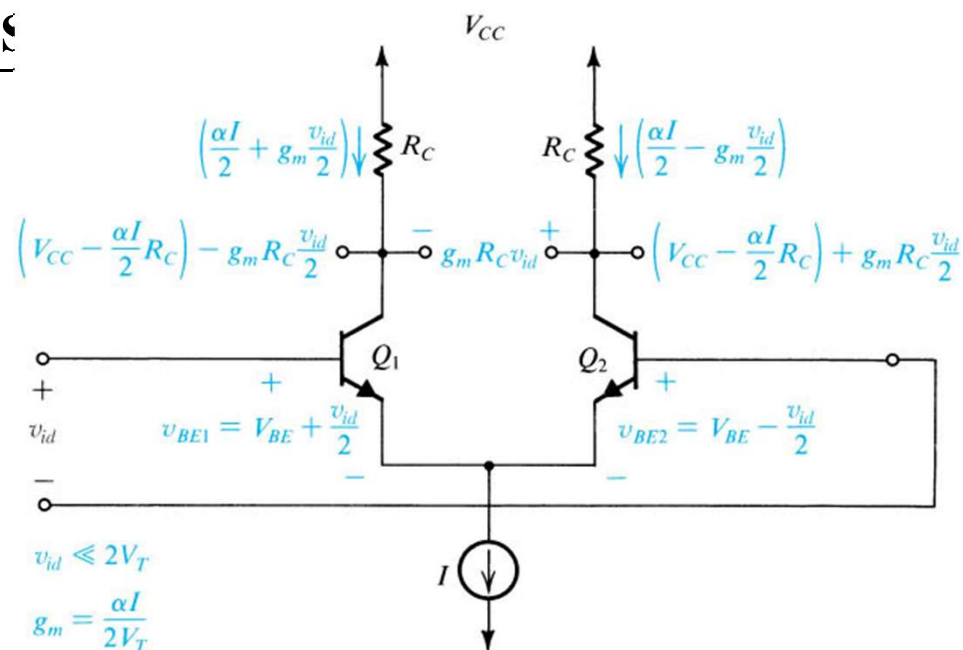
U kolu sa slike upotrebljen je

tranzistor sa  $\alpha=1$ ,  $V_{BE}=0.7\text{V}$ .

Poznato je  $I=1\text{mA}$ ,  $V_{CC}=15\text{V}$  i

$R_C=10\text{k}\Omega$ ,  $v_{BE1}=5+0.005\sin(\omega t)\text{V}$

$v_{BE2}=5-0.005\sin(\omega t)\text{V}$ .



## Odrediti

a)  $i_{C1}$ ,  $i_{C2}$ , ( $i_{C1}=0.5+0.1\sin(\omega t)\text{ mA}$ ,  $i_{C2}=0.5-0.1\sin(\omega t)\text{ mA}$ )

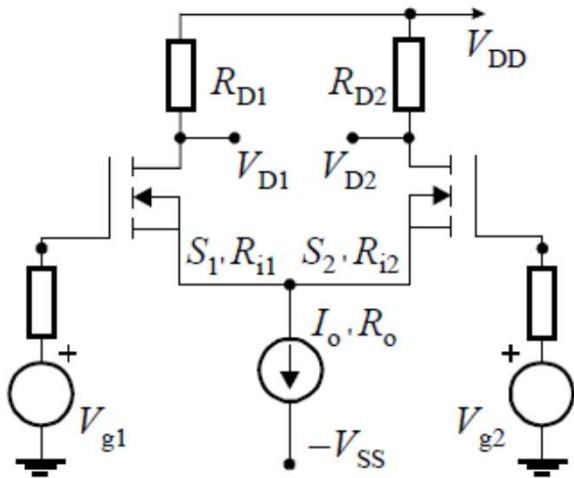
b)  $v_{C1}$ ,  $v_{C2}$ . ( $v_{C1}=10-1\sin(\omega t)\text{ V}$ ,  $v_{C2}=10+1\sin(\omega t)\text{ V}$ )

c)  $A_d$ . ( $A_d=200\text{V/V}$ )

Za one koji žele  
da nauče više

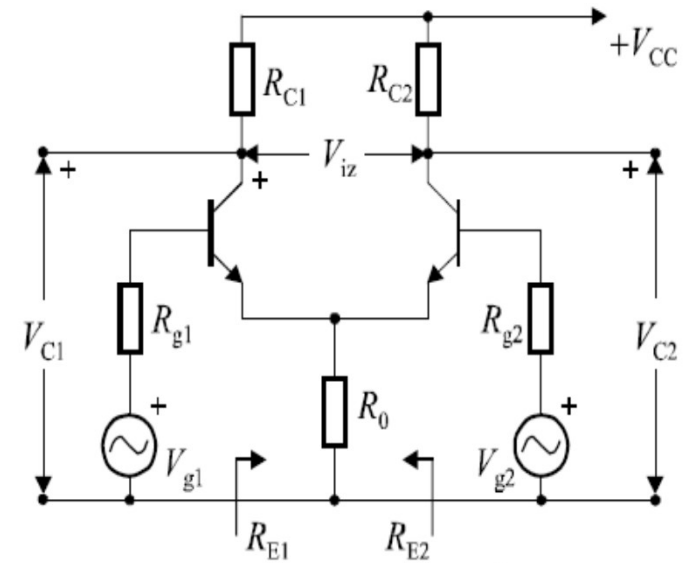
## Realizacija sa BJT

### MOS v.s. BJT



$$R_{uMOS} > R_{uBJT}$$

$$g_{mMOS} < g_{mBJT}$$

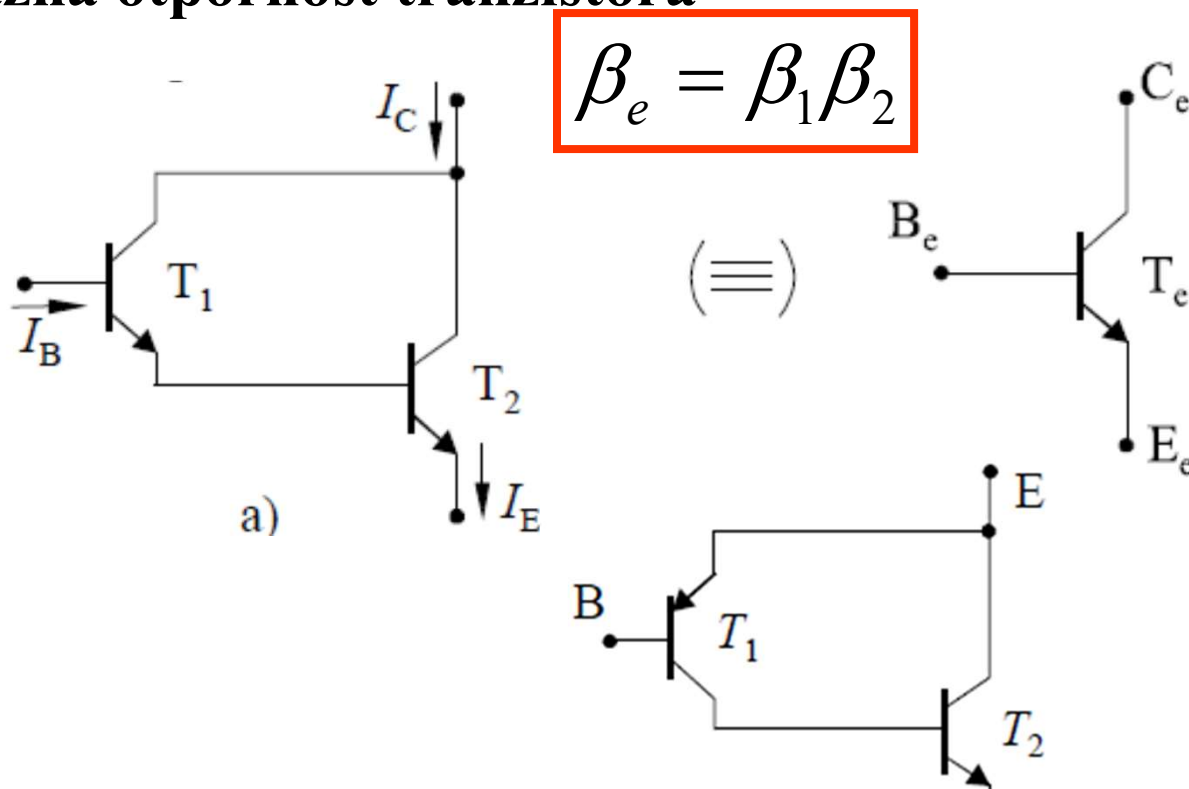


Višestepeni pojačavači

## Direktna sprega

Poboljšanje karakteristika: *Darlingtonova sprega*

Direktnom spregom može da se se postigne veće  $\beta$  i veća ulazna otpornost tranzistora



“Kvazi” PNP

### **Prenosne karakteristike**

**zavisnost trenutne vrednosti izlazne veličine od trenutne vrednosti ulazne veličine.**

**Statička –**

**za spore signale – bez reaktivnih elemenata**

**Dinamička –**

**za VF – sa reaktivnim elementima**

## Statička prenosna karakteristika sa MOST

Počnimo analizu uz pretpostavku da je T1 zakočen a da T2 vodi

$V_{GS1} < V_t$  i počinje da raste:

$V_{G1}$  malo, T1 zakočen,  $I_{D1}=0$

$V_{DS1max} = V_{DD}$ .

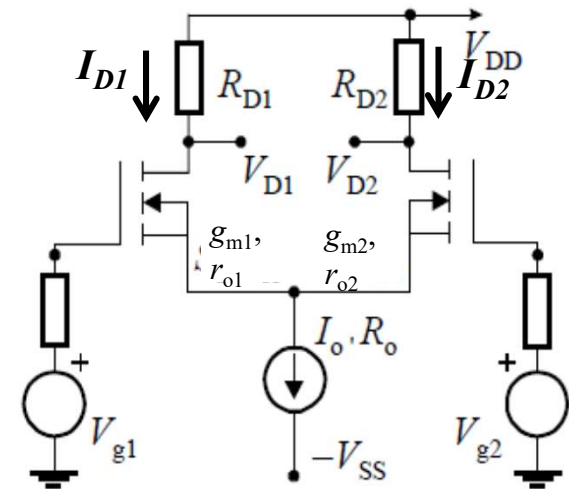
Za  $V_{G2} > V_t$ , T2 vodi,  $I_{D2}=I_o$ ,

$V_{DS2min} = V_{DD} - I_o R_D$

$V_{G1}$  raste, T1 provede:

$I_{D1} + I_{D2} = I_o = Const.$

$I_{D1} \uparrow$ ,  $I_{D2} \downarrow$ ,  $V_{DS1} \downarrow$ ,  $V_{DS2} \uparrow$



$I_{D1max} = I_o$  za

$V_{GS1} - V_t = (I_o/A)^{1/2}$

$V_{DS1min} = V_{DD} - I_o R_D$

$V_{DS2max} = V_{DD}$

## Statička prenosna karakteristika MOST

### Raspon (dinamika) izlaznog signala

$$V_{izmax} = (V_{DS2max} - V_{DS1min}) = V_{DD} - (V_{DD} - I_o R_D)$$

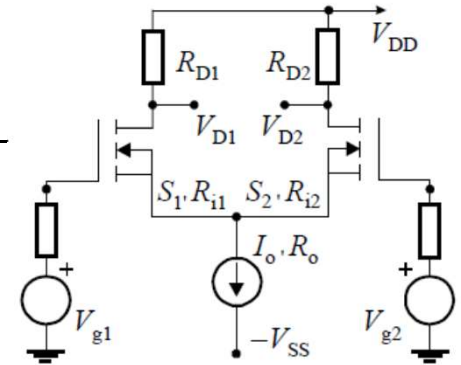
$$V_{izmax} = I_o R_D$$

$$V_{izmin} = (V_{DS2min} - V_{DS1max}) = (V_{DD} - I_o R_D) - V_{DD}$$

$$V_{izmin} = -I_o R_D$$

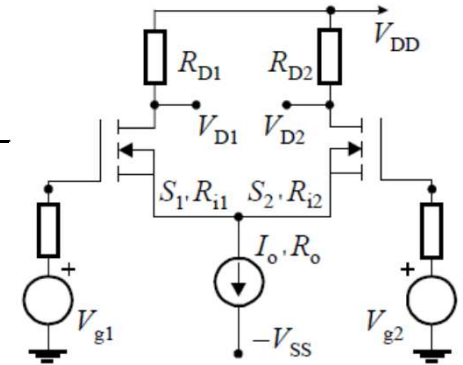
$$\Delta V_{iz} = (V_{izmax}) - (V_{izmin}) = 2R_D I_o$$

Raspon (dinamika) izlaznog signala proporcionalna sa  $R_D$  i  $I_o$ .





## Statička prenosna karakteristika MOST

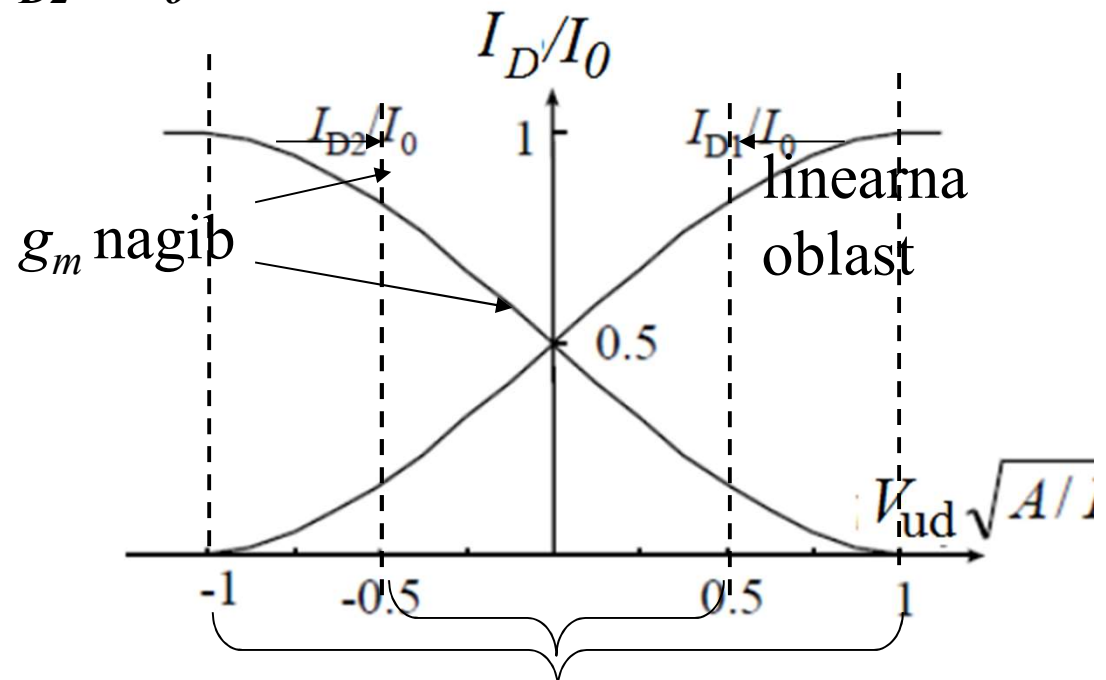


**Raspon (dinamika) ulaznog signala?  
Ograničen oblašću rada oba MOST u  
zasićenju**

$$\text{Za } V_{ud} = (I_o / A)^{1/2} \rightarrow I_{D1} = I_o, I_{D2} = 0$$

$$\text{Za } V_{ud} = -(I_o / A)^{1/2} \rightarrow I_{D1} = 0, I_{D2} = I_o$$

$$\Delta V_u = 2(I_o / A)^{1/2} \sim 0.5V$$

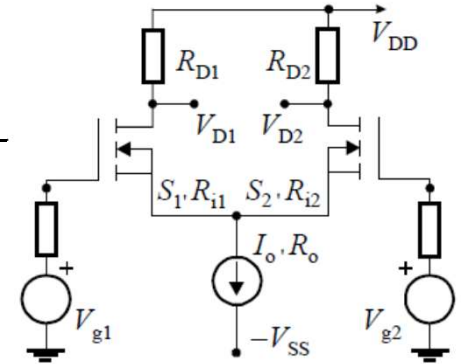
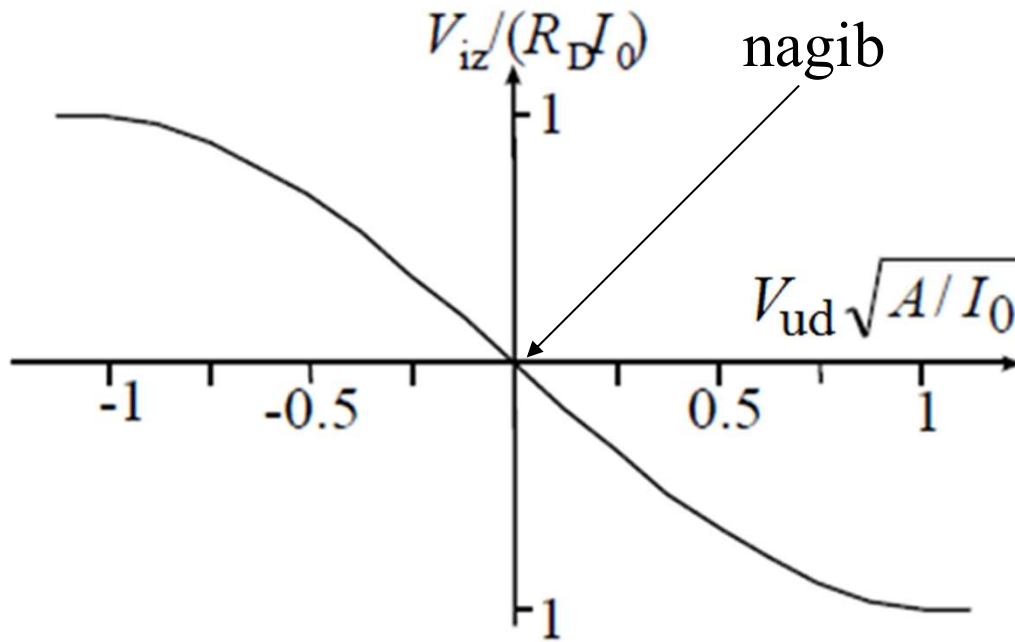


27. novembar 2018.

Višestepeni pojačavač  $\Delta V_u = 2(I_o / A)^{1/2} \sim 0.5V$

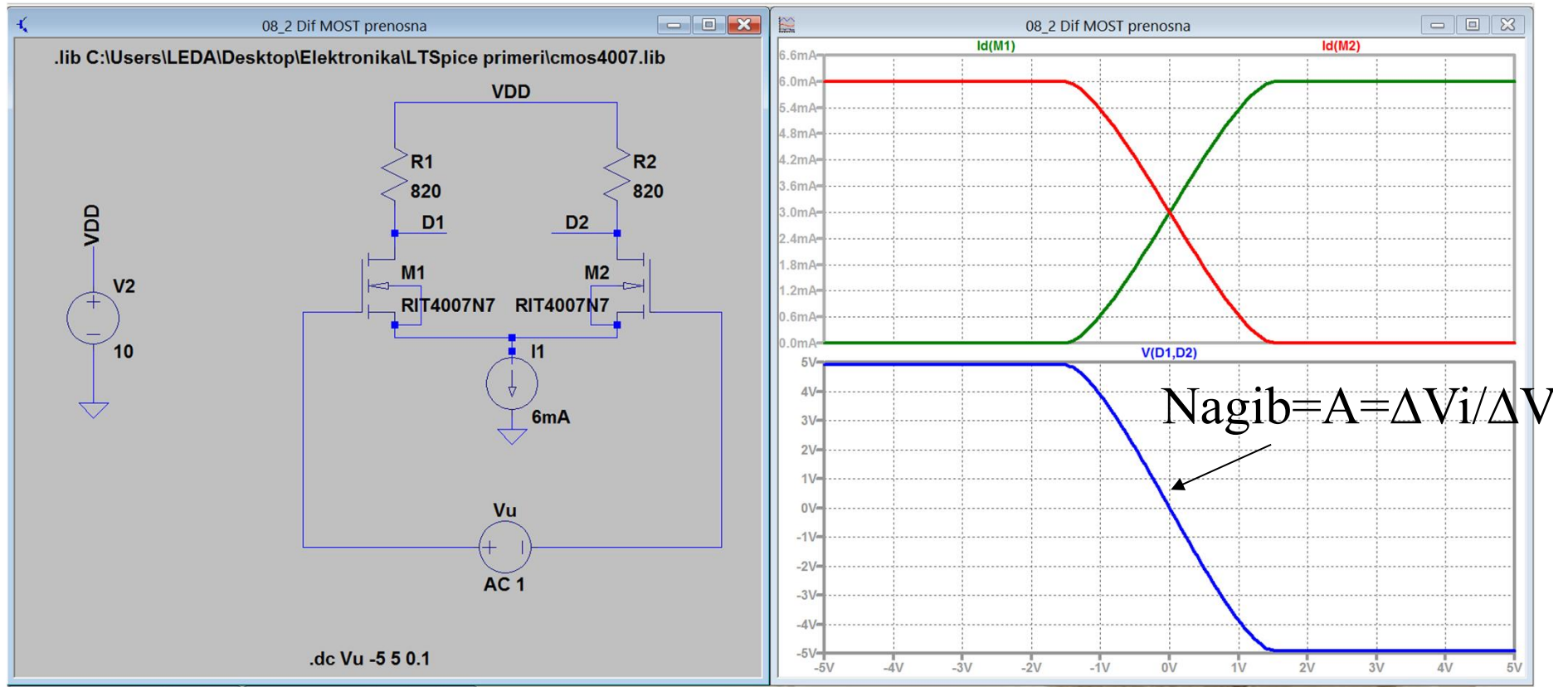
# Statička prenosna karakteristika MOST

## Naponska prenosna



# Statička prenosna karakteristika MOST

## Naponska prenosna

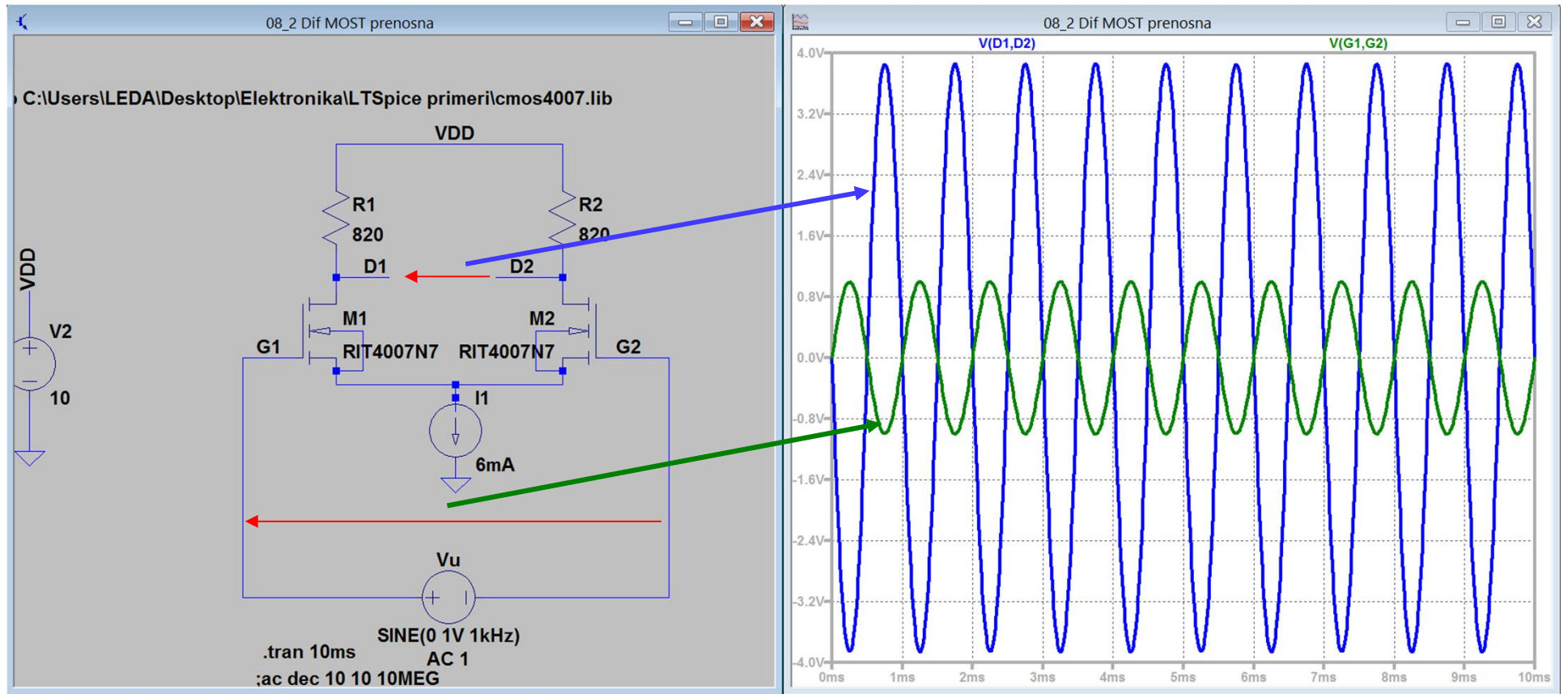


27. novembar 2018.

Višestepeni pojačavači

# Diferencijalni pojačavač sa MOST

## Talasni oblici napona

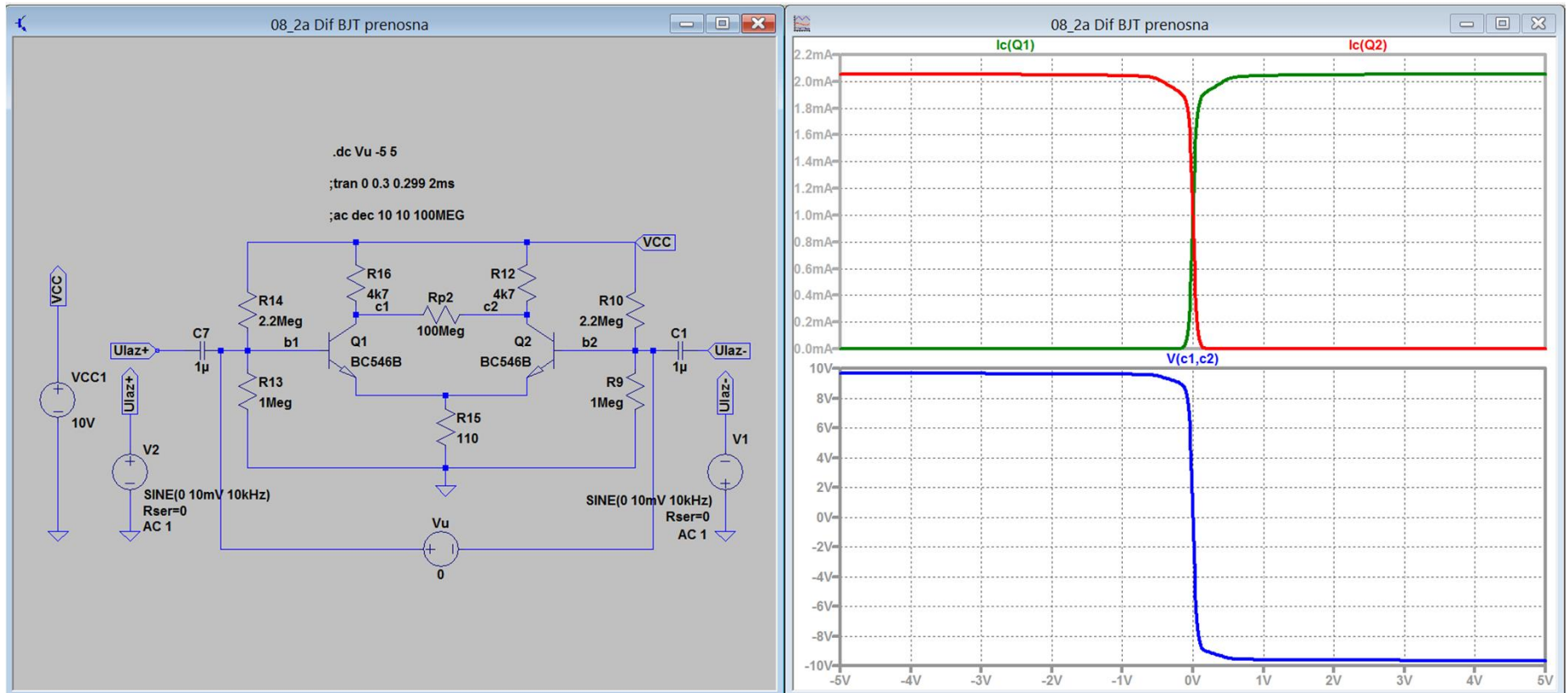


27. novembar 2018.

Višestepeni pojačavači

# Diferencijalni pojačavač sa BJT

## Statička prenosna karakteristika

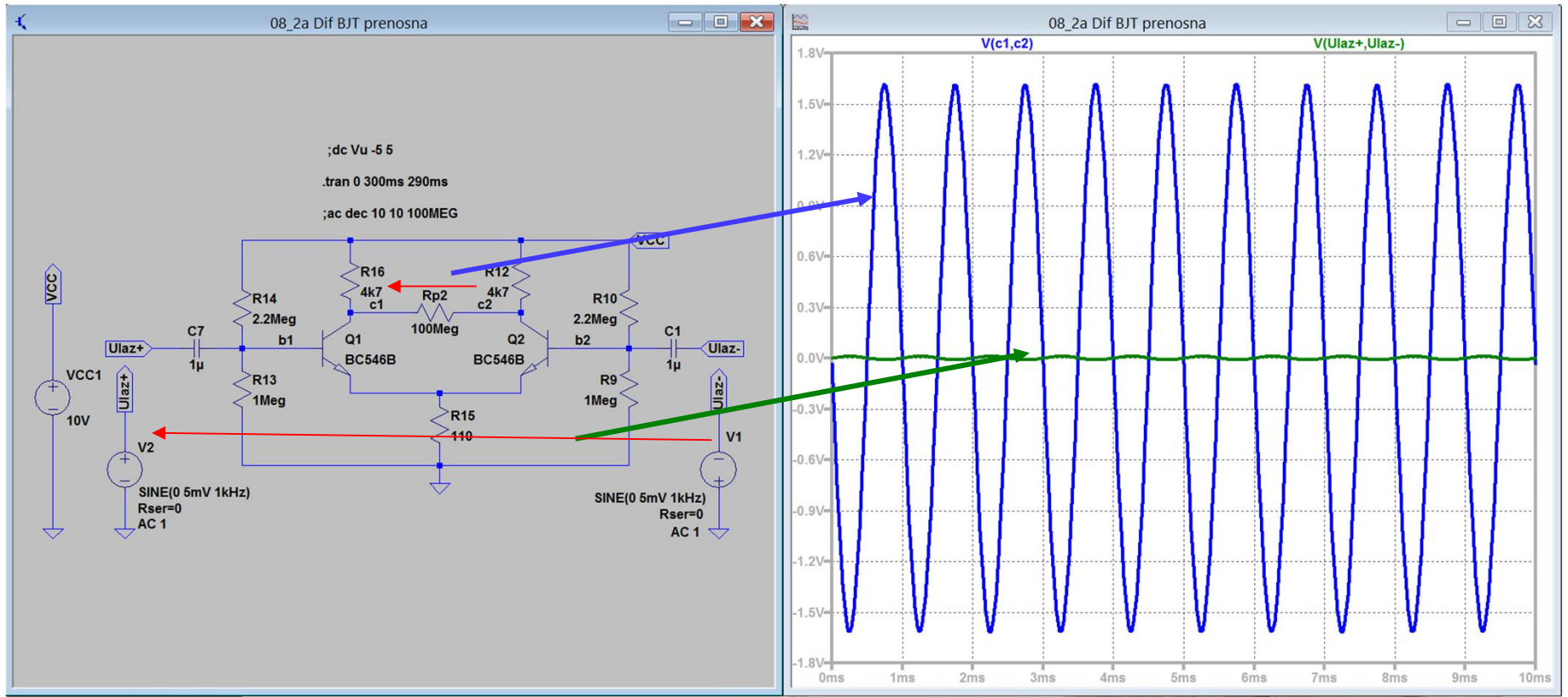


30. novembar

Višestepeni pojačavači

# Diferencijalni pojačavač sa BJT

## Talasnici napona



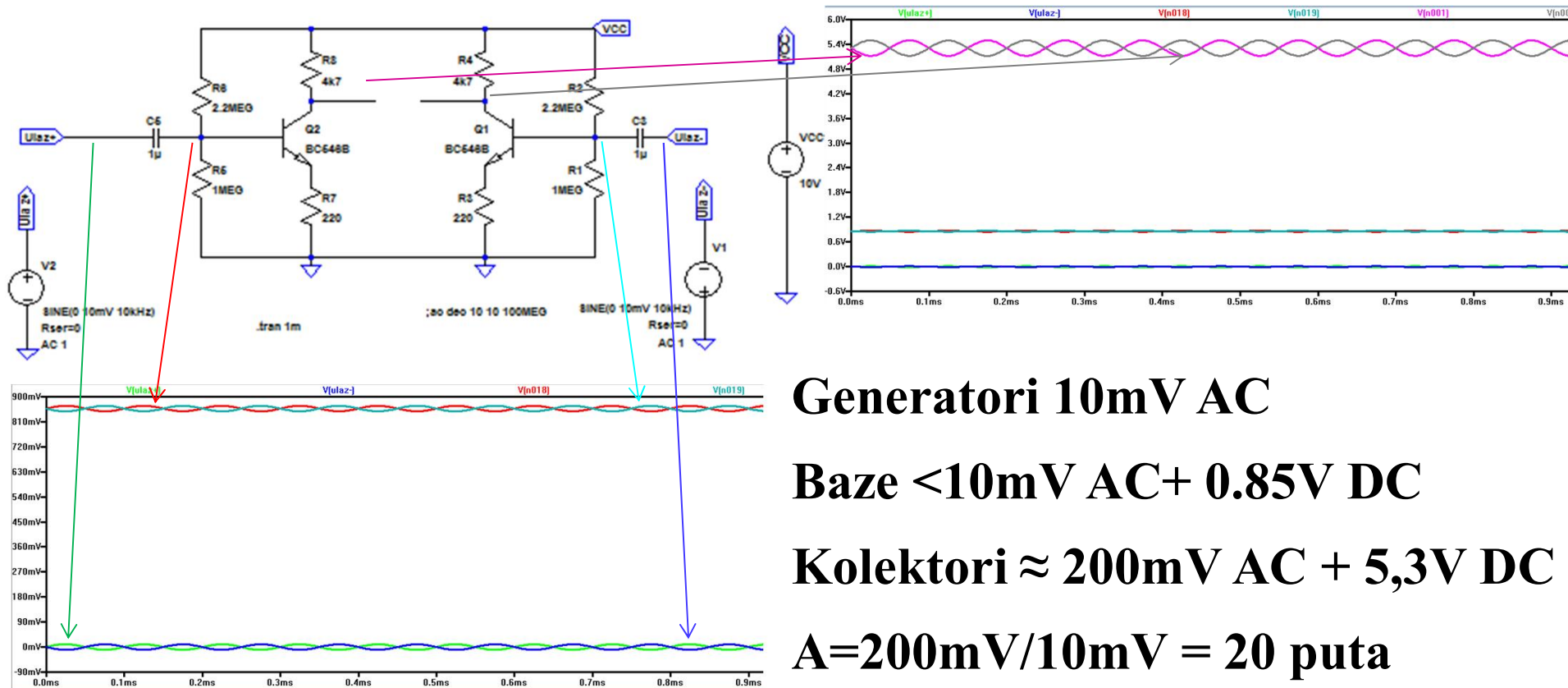


Za one koji žele  
da nauče više

Uporedni pregled vremenski domen

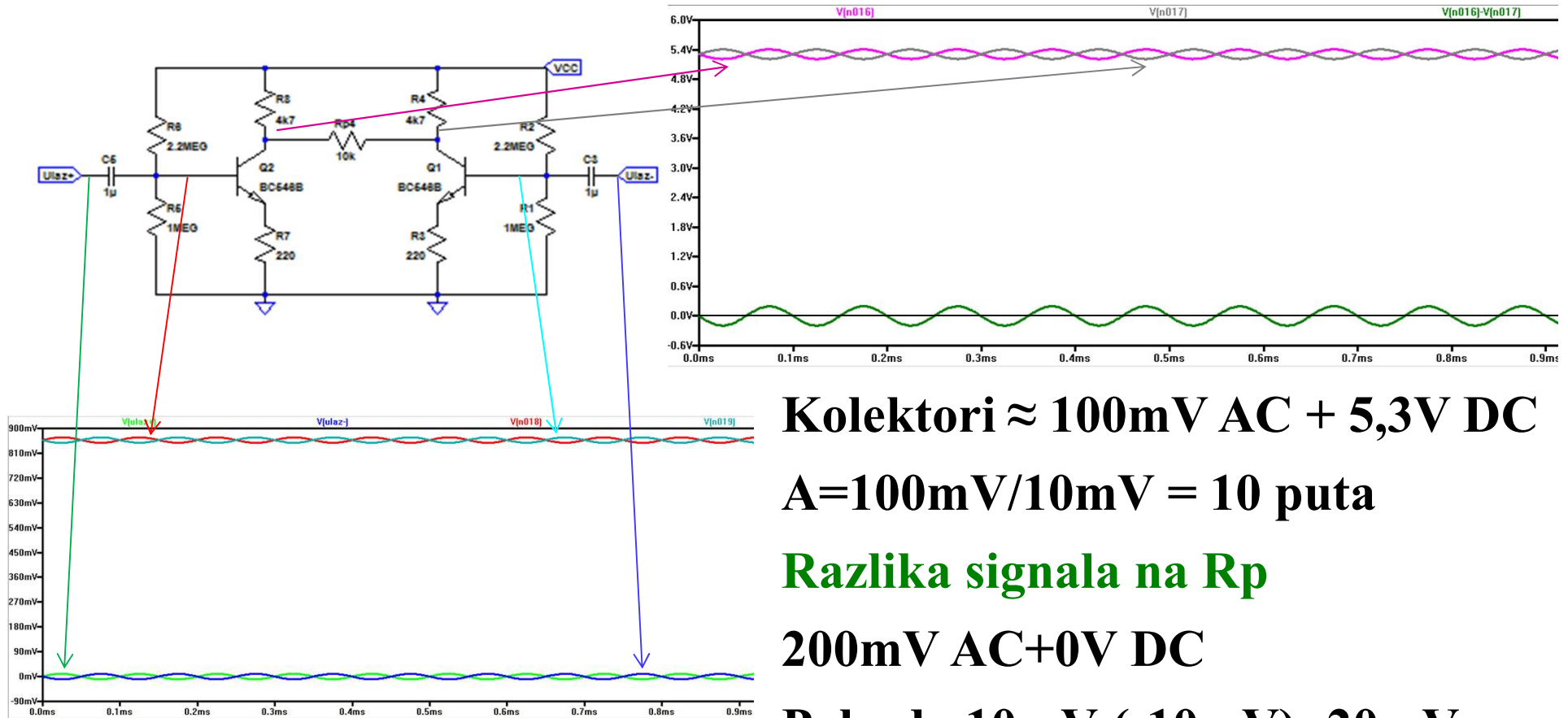
## Dva nezavisna pojačavača sa ZE i RE

pobuđena signalima u protivfazi, amplitude 10mV



## Uporedni pregled vremenski domen

Dva pojačavača sa ZE i RE sa  $R_p=10k$  između kolektora  
pobuđena signalima u protivfazi, amplitude 10mV



Kolektori  $\approx 100mV$  AC + 5,3V DC

$A=100mV/10mV = 10$  puta

Razlika signala na  $R_p$

200mV AC+0V DC

Pobuda  $10mV - (-10mV) = 20mV$

$A_d = 200mV / 20mV = 10$  puta



## Uporedni pregled vremenski domen

**Diferencijalni pojačavač sa  $R_p = 10k$  između kolektora  
pobuđen signalima u protivfazi, amplitude  $10mV$**



**Kolektori  $\approx 850mV$  AC +  $5,3V$  DC**

**$A=850mV/10mV = 85$  puta**

**Razlika signala na  $R_p$**

**$1700mV$  AC+ $0V$  DC**

**Pobuda  $10mV-(-10mV)=20mV$**

**Pojačanje  $A_d=85$**

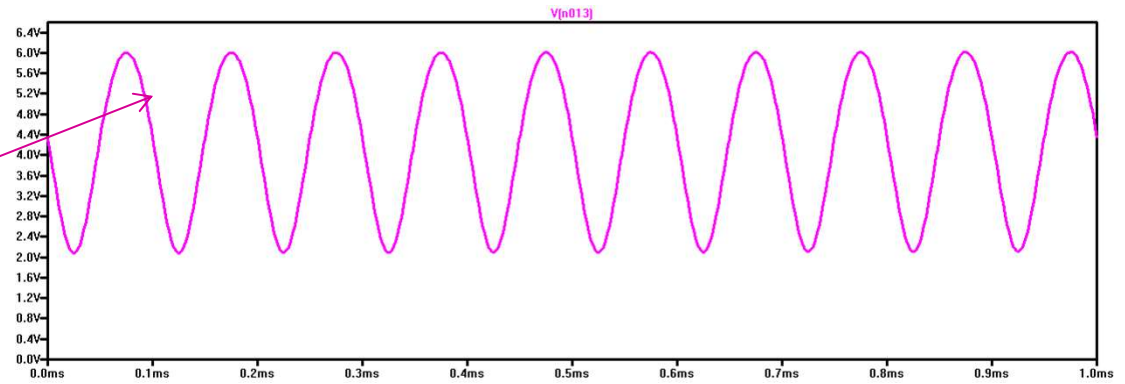
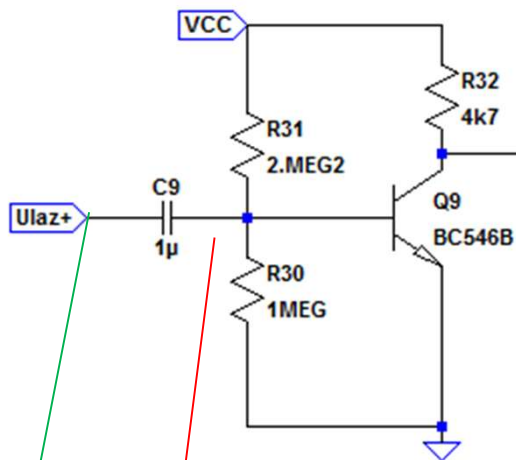
27. novembar 2018.

Višestepeni pojačavači

## Uporedni pregled vremenski domen

### Običan pojačavač sa ZS

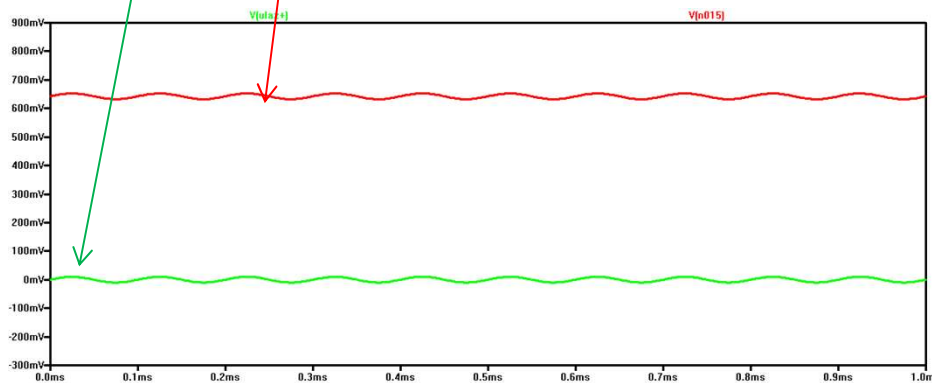
pobuđen signalom amplitude 10mV



**Baza  $\approx 10\text{mV AC} + 0,64\text{V DC}$**

**Kolektor  $\approx 1,95\text{V AC} + 4,3\text{V DC}$**

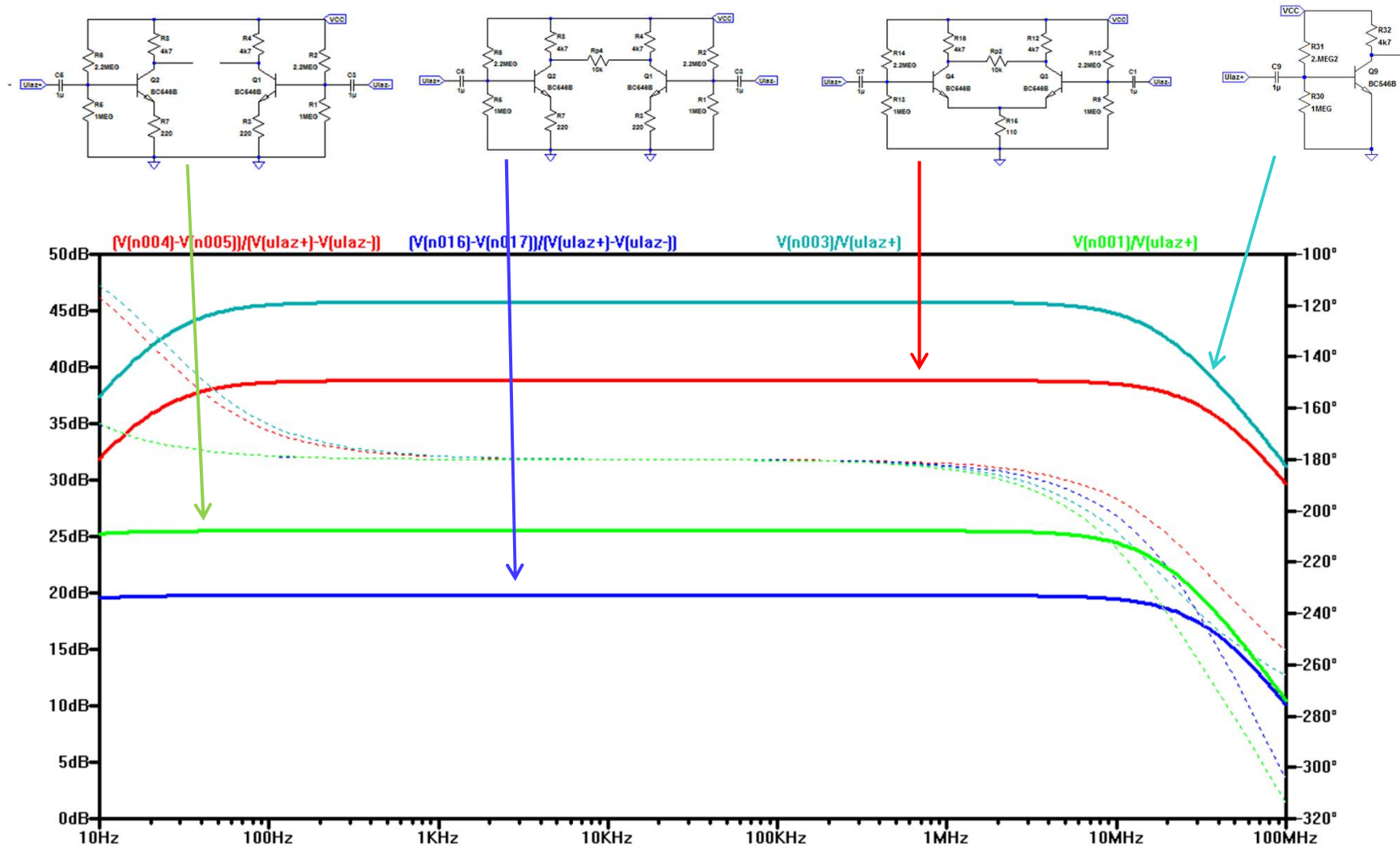
**$A = 1950\text{mV} / 10\text{mV} = 195$  puta**



27. novembar 2018.

Višestepeni pojačavači

# Uporedni pregled frerkvencijske karakteristike



27. novembar 2018.

Višestepeni pojačavači

### Parametri realnih diferencijalnih pojačavača

1. **Naponska razdešenost - ofset (*offset*)**
2. **Strujna razdešenost - ofset (*offset*)**
3. **Faktor potiskivanja napona napajanja  
(*Power Supply Rejection Ratio - PSRR*).**

# Diferencijalni pojačavači

## 1. Naponska razdešenost - ofset

Postoji napon na izlazu i kada je  $V_{UD}=0$ .

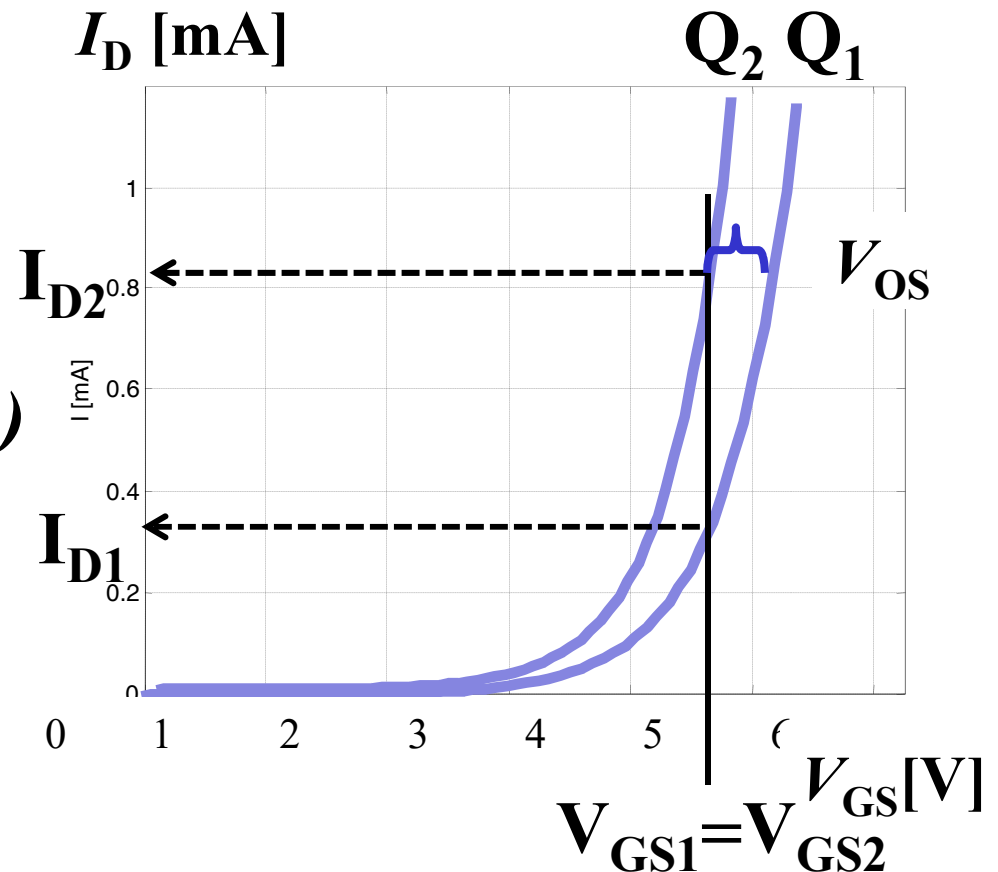
Zašto?



$$V_{IZ} = V_{D1} - V_{D2} = R_D(I_{D1} - I_{D2})$$

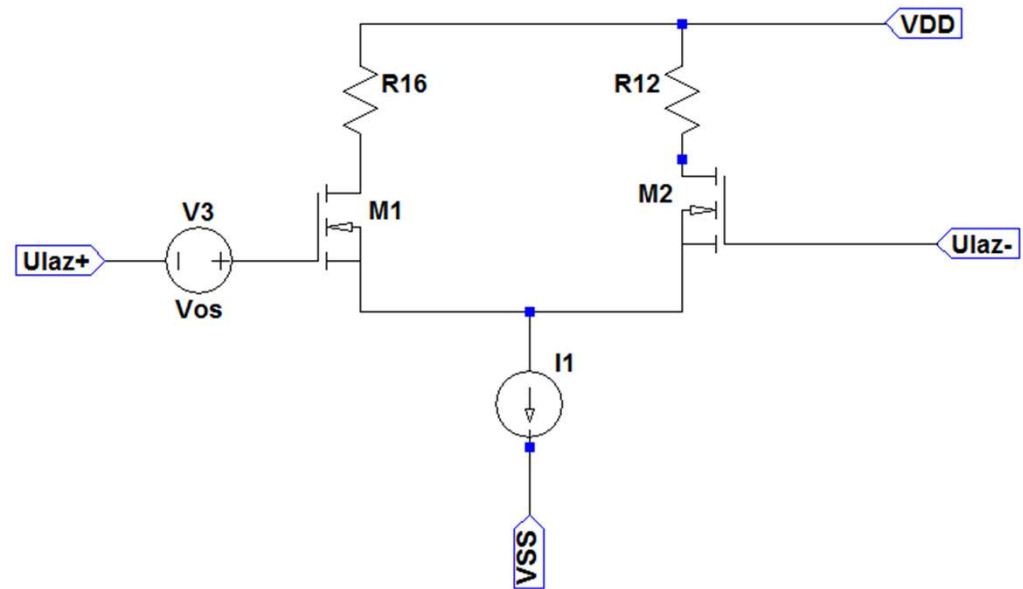
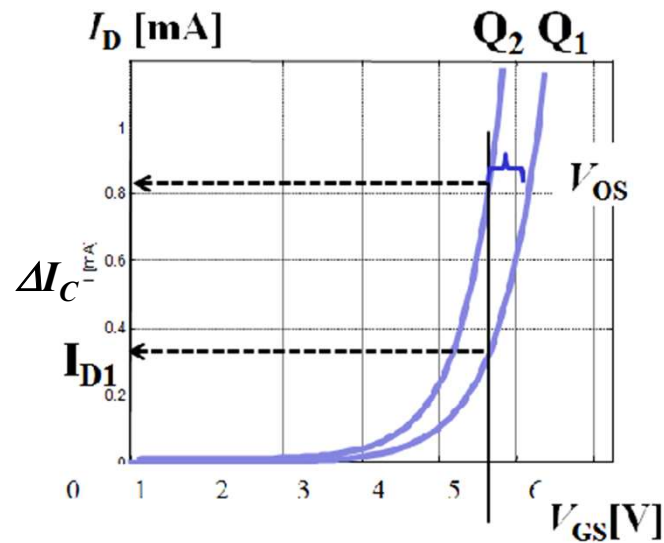
- Posledica različitih  $I_D$

pri  $V_{GS1} = V_{GS2}$



## Naponska razdešenost - ofset

Da bi se izjednačile struje, na jedan ulaz treba dovesti napon  $V_{OS}$



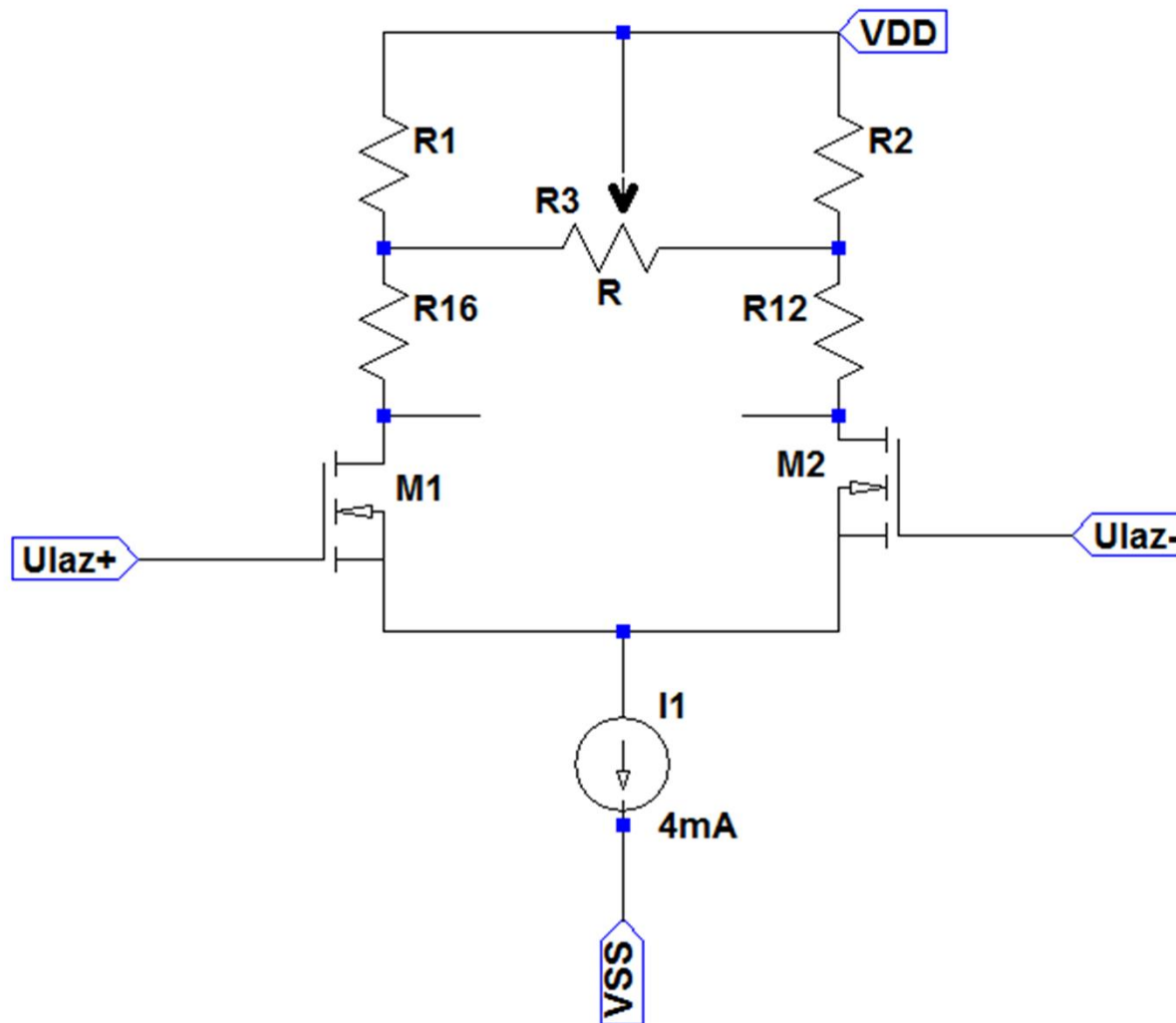
$V_{GS}$  zavisi od temperature, tako da i *naponska razdešenost* zavisi od temperature - *drift ofset napona*

$$\Delta V_{OS}/\Delta T \text{ (x } \mu\text{V/K)}$$

**Manji je kod MOS nego kod bipolarnih**

## Naponska razdešenost - ofset

# Kompenzacija naponskog ofseta



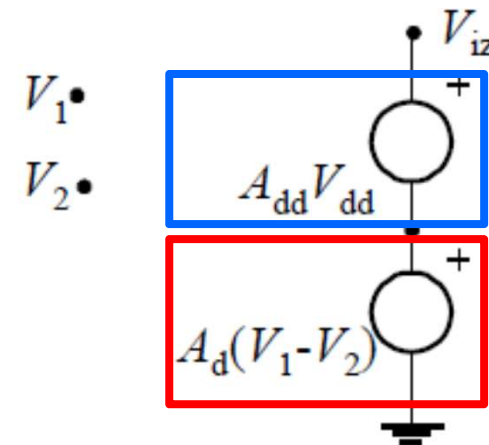
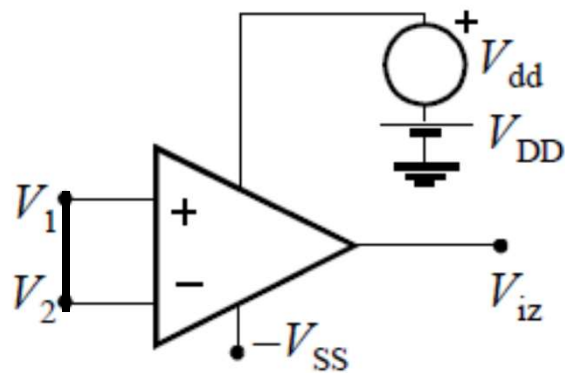
27. novembar 2018.

Višestepeni pojačavači

## Diferencijalni pojačavač

### Faktor potiskivanja napona napajanja (*Power Supply Rejection Ratio – PSSR*)

Koliko promene napona napajanja utiču na odziv?



$$A_{dd} = \frac{V_{iz}}{V_{dd}} \Big|_{V_{ul}=0}$$

$$V_{iz} = A_d (V_1 - V_2) + A_{dd} V_{dd}$$

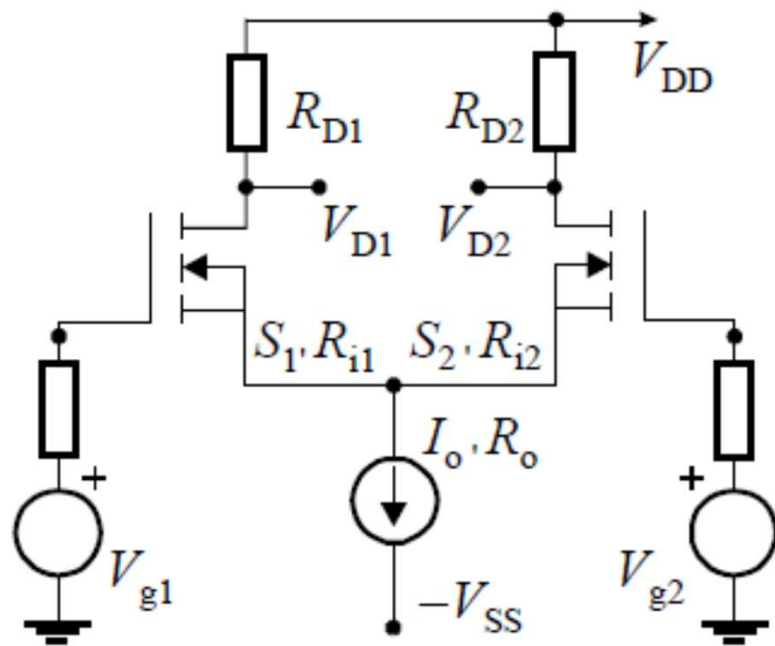
$$= A_d [(V_1 - V_2) + \frac{1}{PSRR_{dd}} V_{dd}]$$

$$PSRR = A_d / A_{dd}$$



## Faktor potiskivanja napona napajanja

### Faktor potiskivanja napona napajanja



$$PSRR \approx \frac{g_m R_D}{2}$$

Da bi se povećao faktor potiskivanja napona napajanja treba povećati  $A_d$ , odnosno treba povećati  $R_D$ .

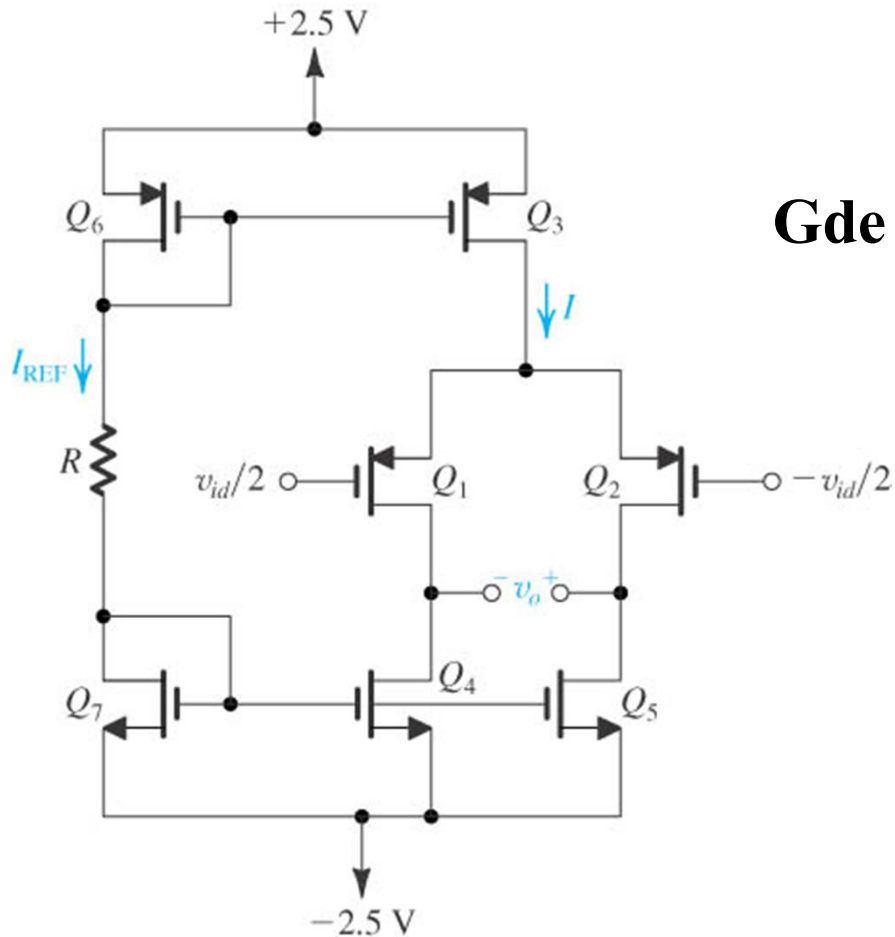
To je moguće uz ...



primenu aktivnog opterećenja u dreznu.

## Faktor potiskivanja napona napajanja

Bolji  $PSRR$ ,  $A_d$  i  $\rho$  uz primenu aktivnog opterećenja u drejnu



Gde je ovde ulaz? Izlaz?



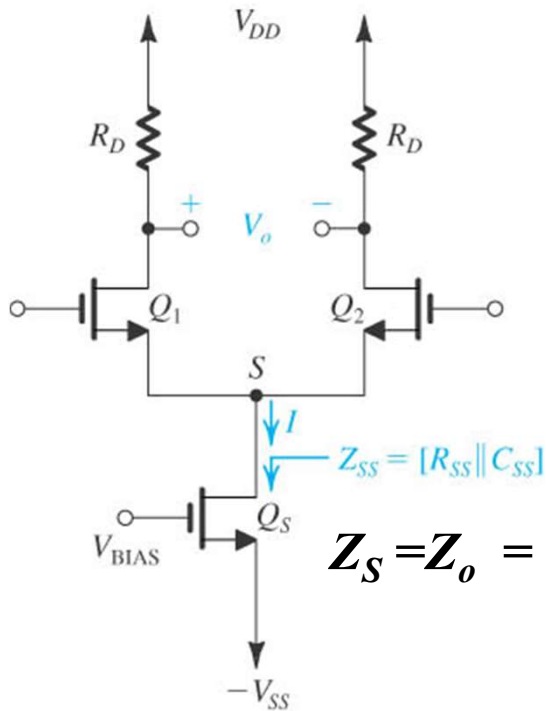
# Diferencijalni pojačavač

## Frekvencijska karakteristika

Definisana parazitnim kapacitivnostima

Za  $A_d$  ista kao kod pojačavača ZE (ZS)

Za  $A_c$  treba zameniti  $R_S$  sa  $Z_S$  ( $R_S \parallel C_S$ )



$$A_d = -\frac{g_m R_D}{1 + s / \omega_v} = -\frac{g_m R_D}{1 + j(f / f_v)}$$

$$A_c \approx -\frac{R_D}{2Z_S} = -\frac{R_D}{2R_S} (1 + sC_S R_S)$$

$$f_Z = \frac{1}{2\pi C_S R_S}$$

$$A_c = -\frac{R_D}{2R_S} (1 + j(f / f_Z))$$

$$Z_S = Z_o = (R_o \parallel C_o) = (R_S \parallel C_S)$$

## Frekvencijska karakteristika

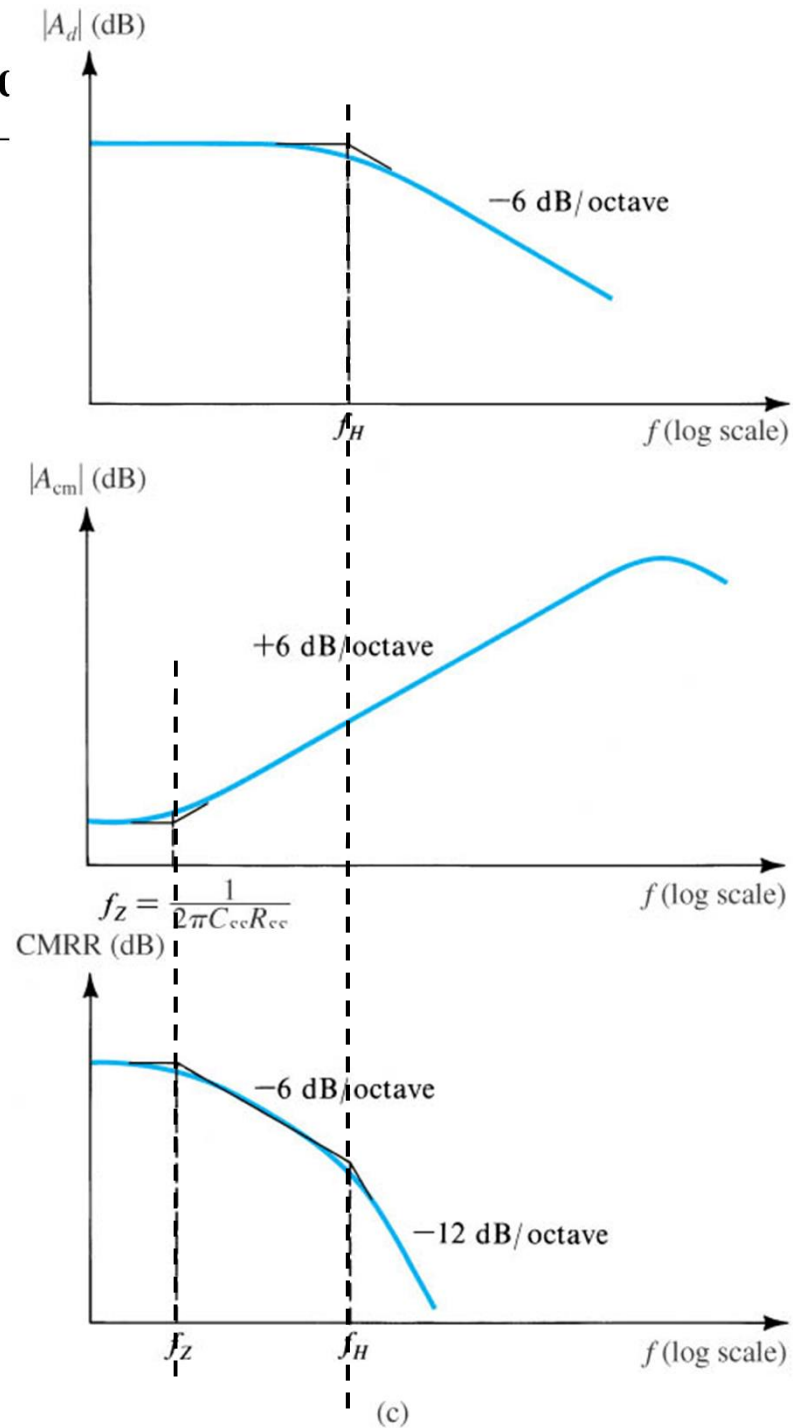
$$A_d = -\frac{g_m R_D}{1 + j(f / f_v)}$$

$$A_c = -\frac{R_D}{2R_S}(1 + j(f / f_Z))$$

$$\rho = \frac{2g_m R_S}{(1 + j(f / f_v))(1 + j(f / f_Z))}$$

27. novembar 2018.

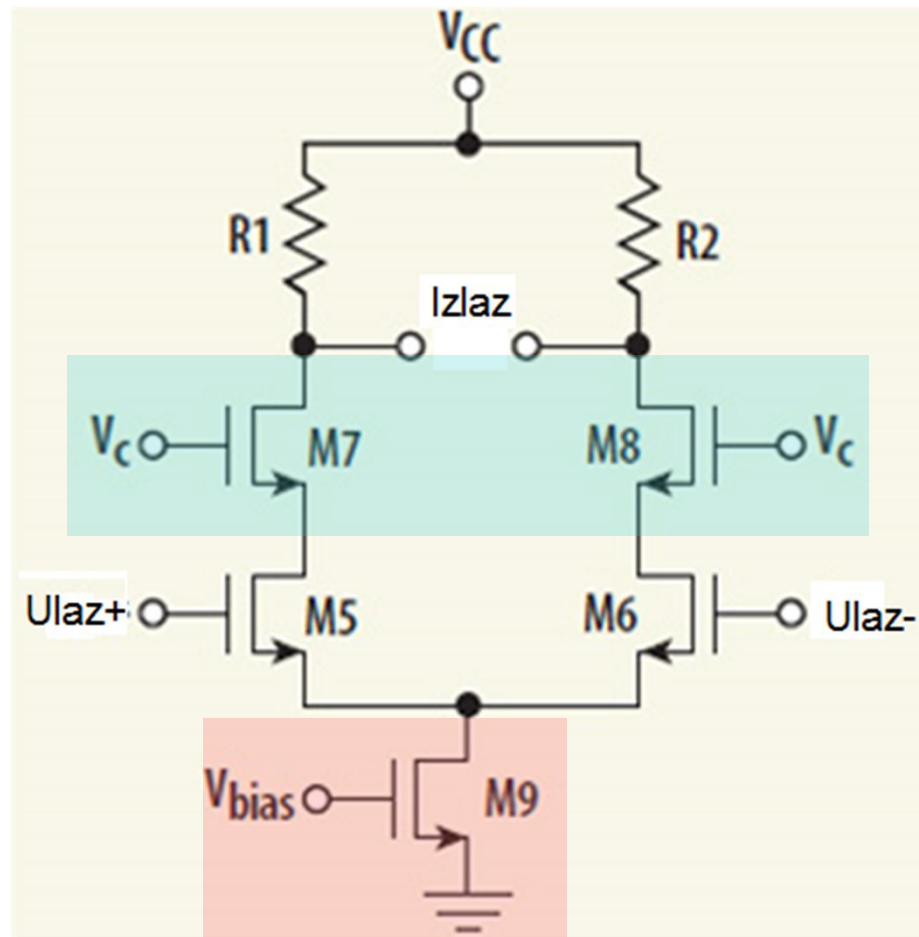
Višest



## Poboljšanje performansi

**Veće pojačanje – bolji osnovni pojačavači**

**Rešenje – kaskodna sprega**



27. novembar 2018.

Višestepeni pojačavači

# Višestepeni pojačavači

## Sadržaj

---

### 1. Zašto višestepeni?



- Da li smo do sada pominjali neke višestepene?



### 2. Kako se realizuju?



### 3. Osobine idealnih i realnih višestepenih pojačavača

- Pojačanje
- Frekvencijska karakteristika

## Zašto višestepeni pojačavači?

---



**Da bi se dobili BOLJI pojačavači.**

**Koji su bolji?**

**Sličniji idealnim:**

**veće pojačanje**

**optimalna ulazna otpornost**

**optimalna izlazna otpornost**

**bolje frekvencijske karakteristike (ALI...)**



**Za naponske pojačavače to znači:**

- **Veće pojačanje napona**
- **Ulazna otpornost VEĆA**
- **Izlazna otpornost MANJA**



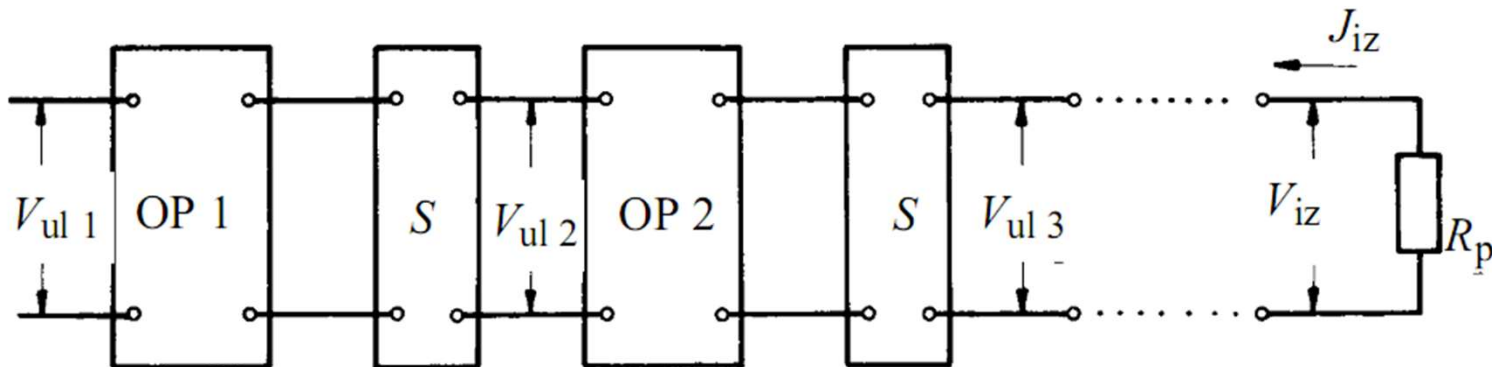
## Zašto višestepeni pojačavači?



Jedan pojačavački stepen obično nije dovoljan da bi se postiglo željeno pojačanje

**od generatora do potrošača.**

Veće pojačanje može da se postigne spregom više osnovnih pojačavačkih stepena (OP).



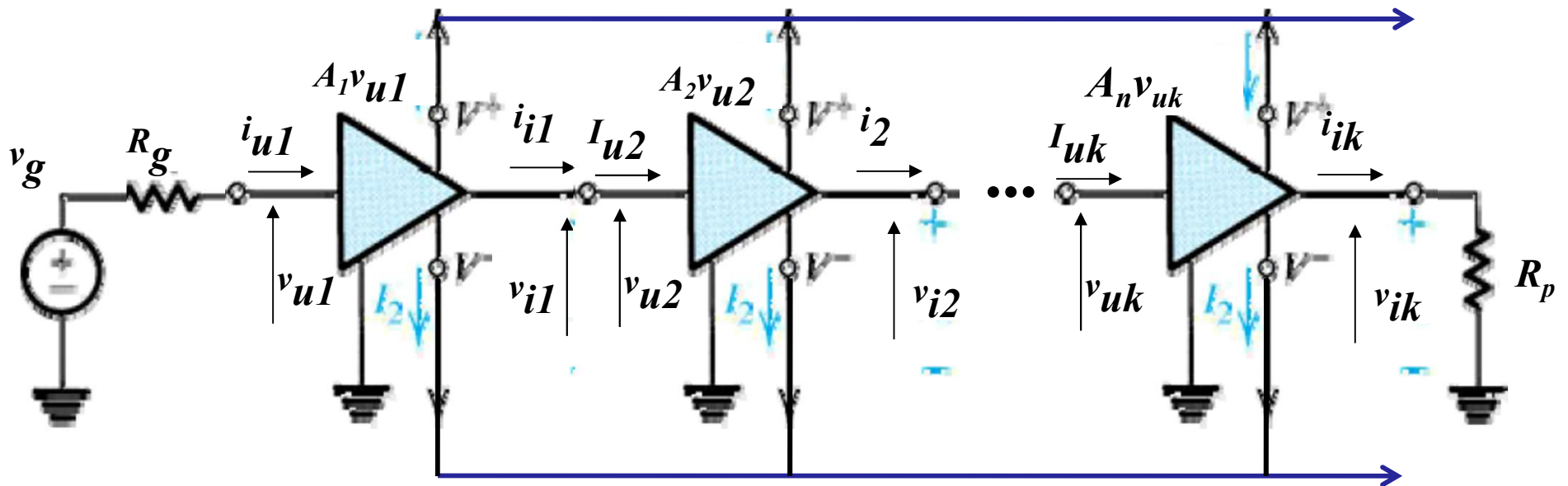
**Kaskadna veza pojačavača**

## Princip povezivanja višestepenih pojačavača

Za prvi stepen vezuje se pobudni generator čija je unutrašnja otpornost  $R_g$ .

Za izlaz poslednjeg stepena vezuje se potrošač  $R_p$ .

Vezuju se za isti napon napajanja



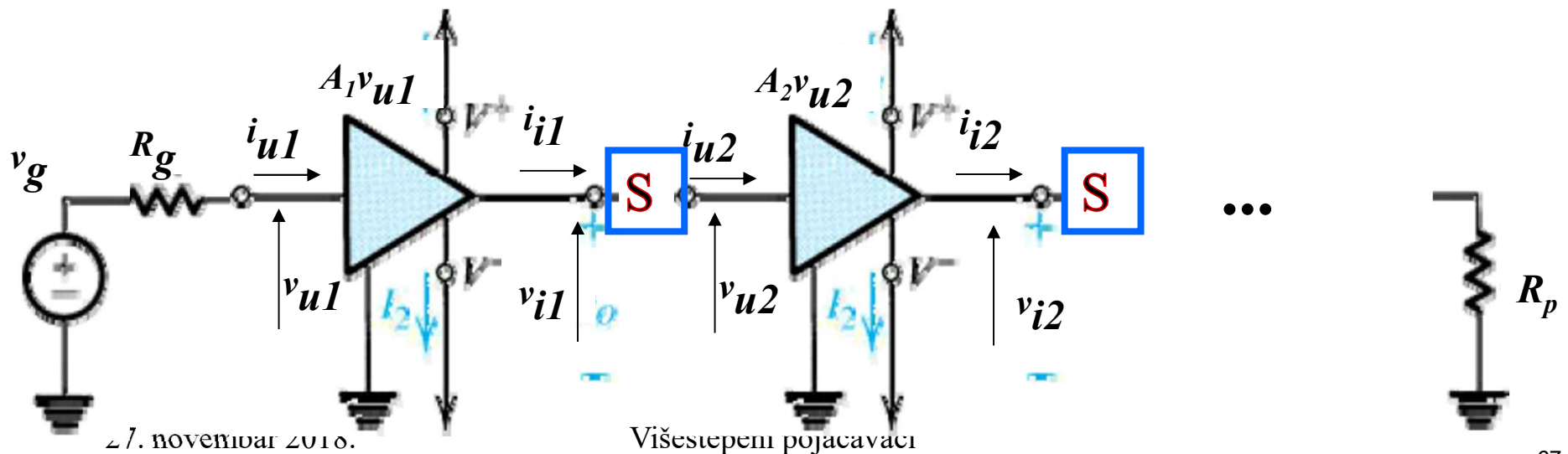
## Princip povezivanja višestepenih pojačavača

**Idealno: DC radna tačka svakog stepena postavlja se nezavisno za savaki stepen posebno.**

**Ovo implicira da su pojedini stepeni međusobno razdvojeni za jednosmerne signale (*Medutim ...*).**

**Mora da postoji sprega za naizmenične signale.**

**Kolo za spregu?**

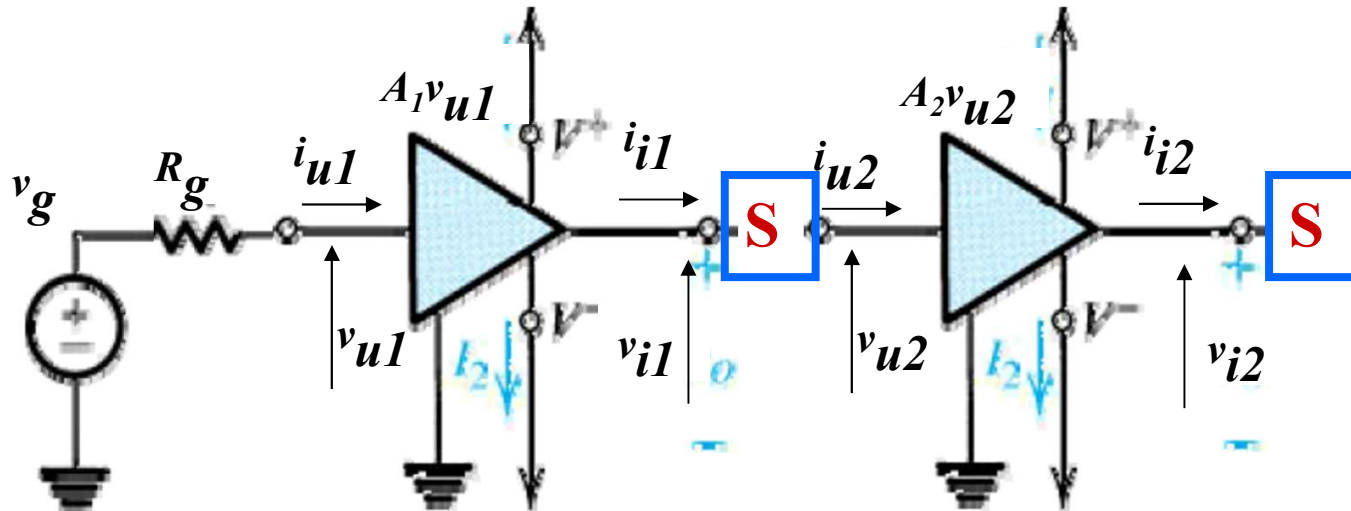


Kako se realizuju višestepeni pojačavači ??



Kako razdvojiti DC a ne oslabiti AC?

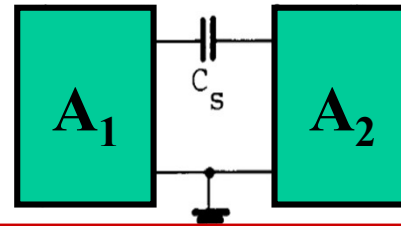
Šta čini kolo za spregu "S"?



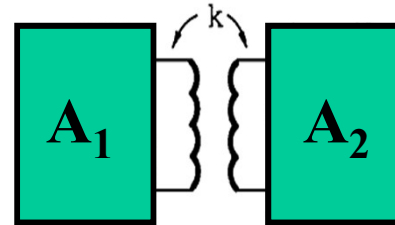
## Kako se realizuju višestepeni pojačavači

### Vrste sprege:

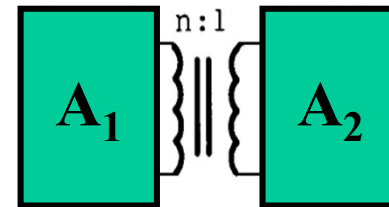
Kapacitivna



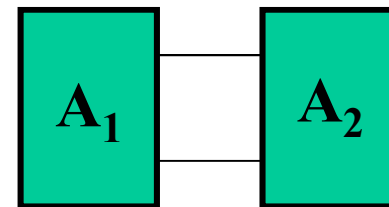
Induktivna



Transformatorska



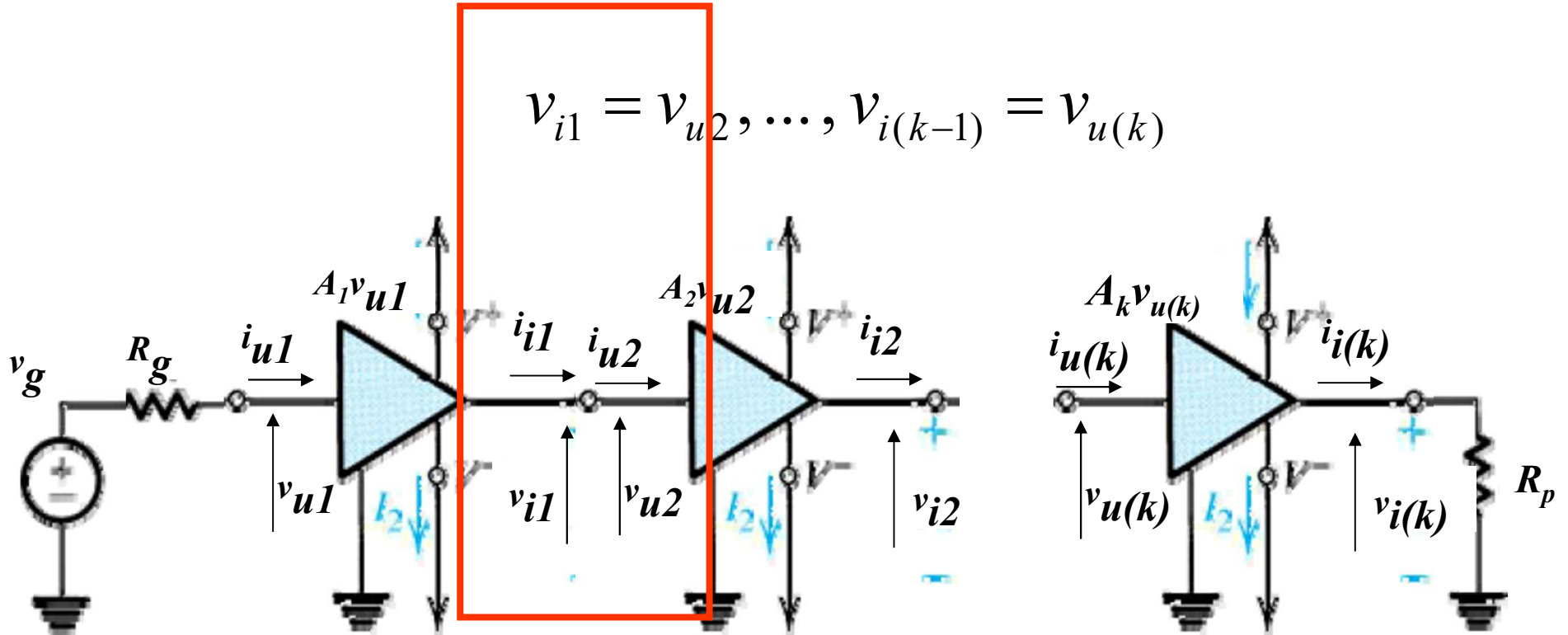
Direktna



## Osobine višestepenih pojačavača

**Idealno kolo za spregu ne slabi naizmenične, a blokira jednosmerne signale.**

**Tada za naizmenične signale važi:**

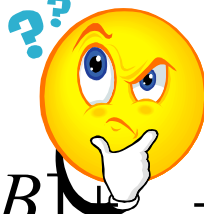


## Osobine višestepenih pojačavača

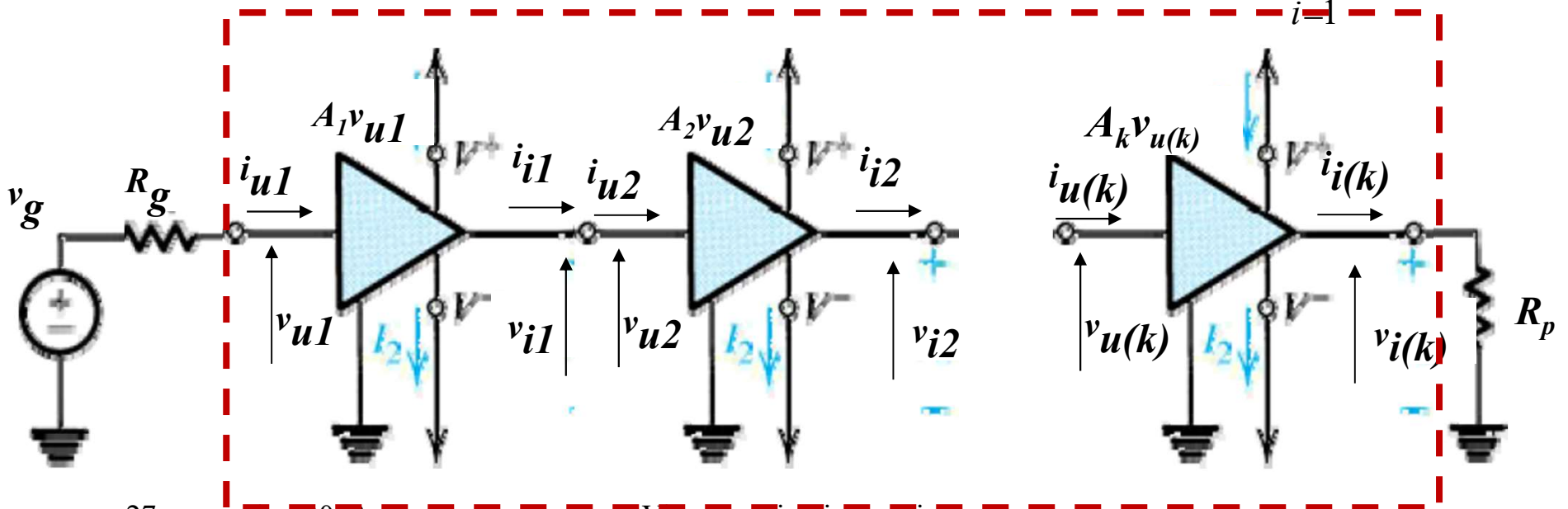
### Pojačanje

$$A = \frac{v_{ik}}{v_{u1}} = \frac{v_{ik}}{v_{uk} = v_{i(k-1)}} \dots \frac{v_{i2}}{v_{i1}} \frac{v_{i1}}{v_{u1}} = A_k A_{k-1} \dots A_2 A_1 = \prod_{i=1}^k A_i$$

### Pojačanje u dB?



$$a[dB] = a_k[dB] + a_{k-1}[dB] + \dots + a_2[dB] + a_1[dB] = \sum_{i=1}^k a_i[dB]$$



## Osobine višestepenih pojačavača

---

**Realni:**

**Pojačanje pojedinih stepena nije jednako pojačanju neopterećenih pojačavača!**

**Svaki prethodni stepen opterećen je ulaznom otpornošću narednog.**

**Svaki naredni stepen pobuđuje se preko izlazne otpornosti prethodnog.**

**ZATO SU VAŽNE ULAZNE/IZLAZNE  
OTPORNOSTI!**

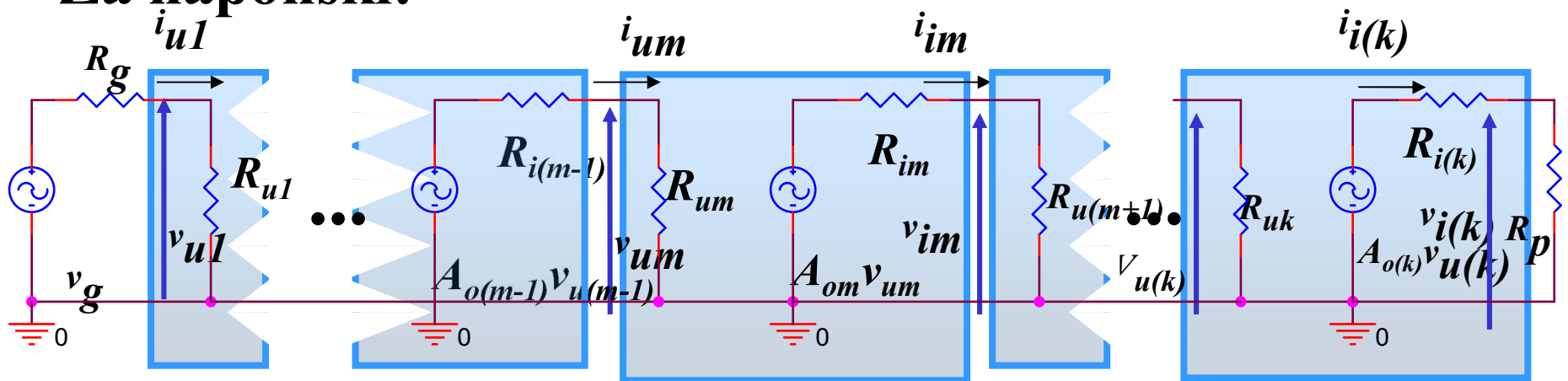


Realni:

## Osobine višestepenih pojačavača

Za naizmenični signal,  $m$ -ti stepen u pojačavačkom lancu okarakterisan je pojačanjem  $A_{om}$  (naponskim/strujnim), ulaznom otpornošću  $R_{um}$  i izlaznom otpornošću  $R_{im}$ .

Za naponski:



$$A_m = \frac{v_{im}}{v_{um}} = A_{0m} \frac{R_{u(m+1)}}{R_{u(m+1)} + R_{im}}$$

Realni:

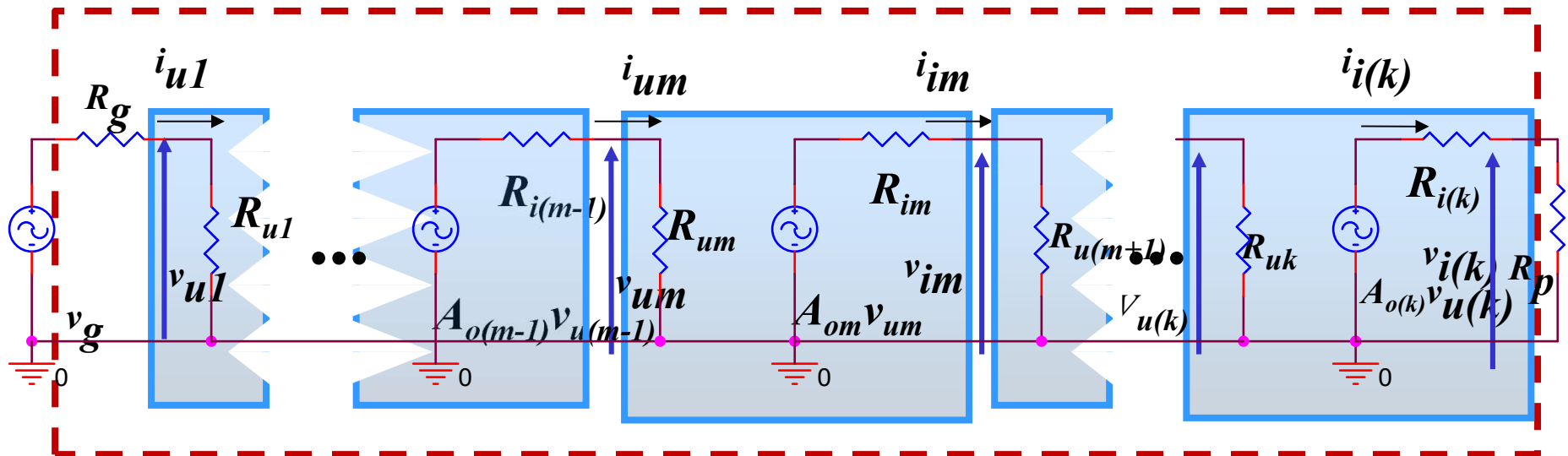
Osobine višestepenih pojačavača

Za one koji žele  
da nauče više

**Ukupno pojačanje**  $A_u = \frac{V_{i(k)}}{V_g} = \frac{V_{i(k)}}{V_{i(k-1)}} \dots \frac{V_{i2}}{V_{i1}} \frac{V_{i1}}{V_{u1}} \frac{V_{u1}}{V_g}$

$$A_u = \frac{V_{i(k)}}{V_{u(k)}} \dots \frac{V_{i2}}{V_{u2}} \frac{V_{i1}}{V_{u1}} \frac{V_{u1}}{V_g}$$

$$A_u = A_k A_{k-1} \dots A_2 A_1 \frac{R_{u1}}{R_{u1} + R_g}$$



27. novembar 2018.

Višestepeni pojačavači

Realni:

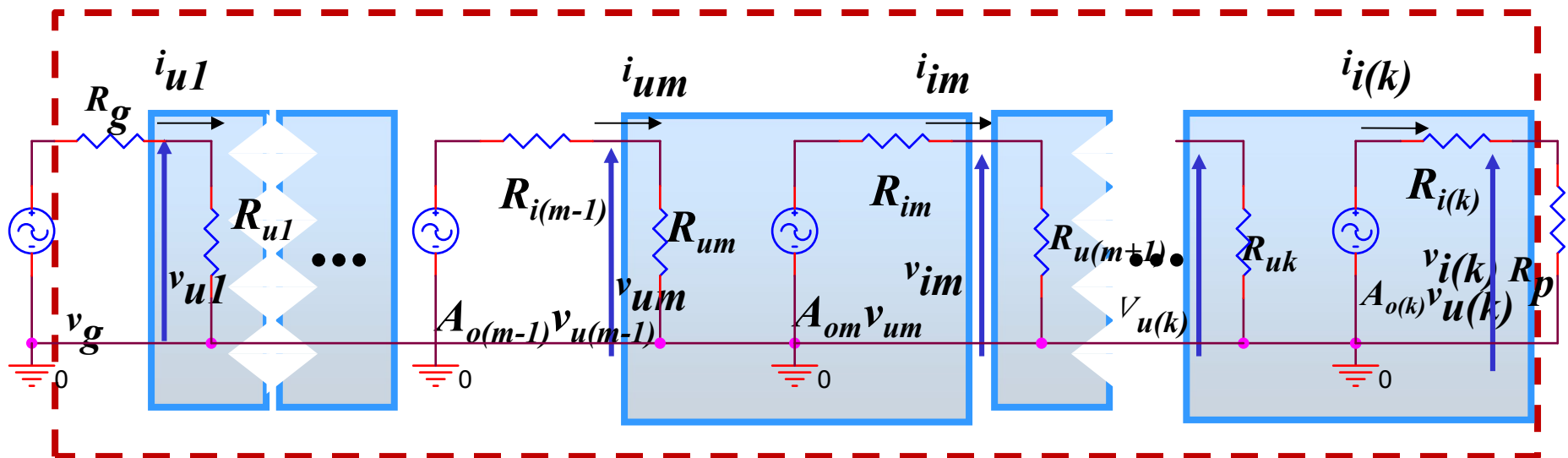
## Osobine višestepenih pojačavača

Za one koji žele  
da nauče više

### Ukupno pojačanje

$$A_u = \frac{R_p}{R_p + R_{i(k)}} A_{o(k)} \frac{R_{u(k)}}{R_{u(k)} + R_{i(k-1)}} A_{o(k-1)} \cdots \frac{R_{u2}}{R_{u2} + R_{i1}} A_{o1} \frac{R_{u1}}{R_{u1} + R_g}$$

$$A_u = \frac{R_{u1}}{R_{u1} + R_g} \frac{R_p}{R_p + R_{i(k)}} \left( \prod_{i=1}^k A_{oi} \right) \left( \prod_{i=2}^k \frac{R_{u(i)}}{R_{u(i)} + R_{i(i-1)}} \right)$$



27. novembar 2018.

Višestepeni pojačavači

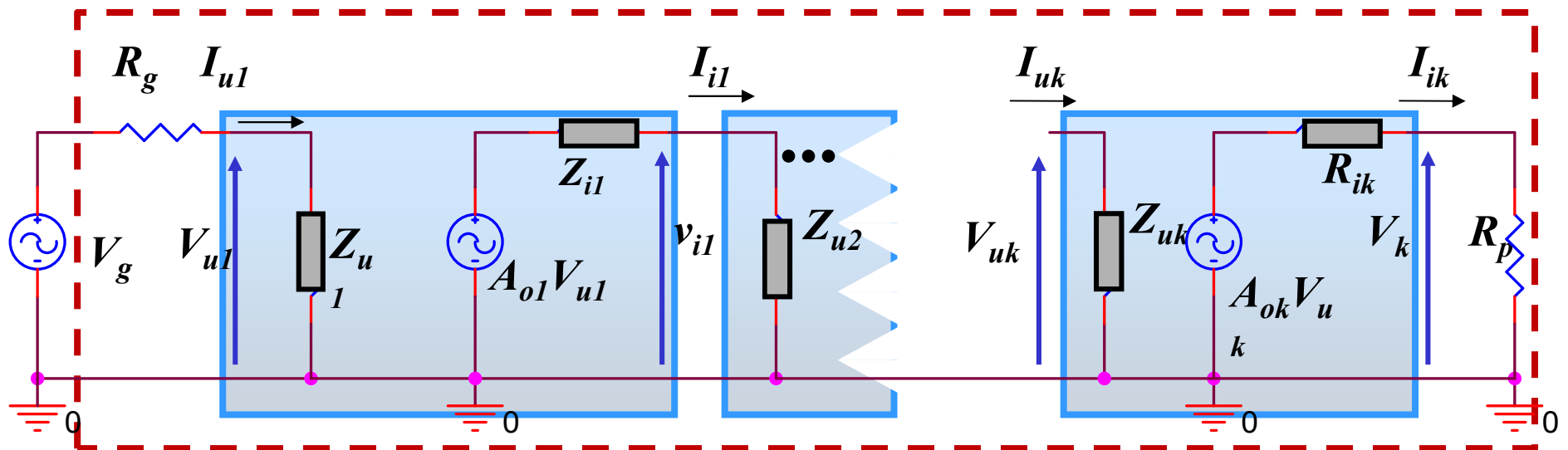
Realni:

## Osobine višestepnih pojačavača

Za one koji žele  
da nauče više

### Ukupno pojačanje pri VF

$$A_{uv}(s) = \frac{Z_{u1}}{Z_{u1} + R_g} \frac{R_p}{R_p + Z_{i(k)}} \left( \prod_{i=1}^k A_{ov(i)}(s) \right) \left( \prod_{i=2}^k \frac{Z_{u(i)}}{Z_{u(i)} + Z_{i(i-1)}} \right)$$



27. novembar 2018.

Višestepeni pojačavači

**Realni:**

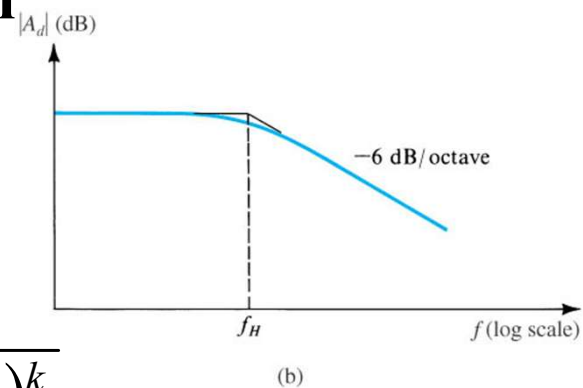
### Osobine višestepenih pojačavača

**Ukupno pojačanje pri VF, opterećen sa  $R_p$  i pobuđen realnim generatorom sa  $R_g$**

**Neka su svi pojačavački stepeni identični (isto  $A_0$ ,  $\omega_v$ ) sa realnim ulaznim ( $R_u$ ) i izlaznim otpornostima ( $R_i$ ) i**

$$A_{ov(i)}(s) = \frac{A_{0(i)}}{1 + j\omega / \omega_{v(i)}} = \frac{A_0}{1 + j\omega / \omega_v}$$

$$A_{uv}(s) = K \left( \frac{A_0}{1 + j\omega / \omega_v} \right)^k = K \frac{A_0^k}{(1 + j\omega / \omega_v)^k}$$



**gde je**

$$K = \frac{R_u}{R_u + R_g} \frac{R_p}{R_p + R_i} \left( \frac{R_u}{R_u + R_i} \right)^{k-2}$$

**Realni:**

## Osobine višestepenh pojačavača

---

### Ukupno pojačanje pri VF

gornja granična frekvencija definisana je sa

$$A_{uv}(\omega_{uv}) = K \frac{A_0^k}{(1 + j\omega_{uv} / \omega_v)^k} = \frac{KA_0^k}{\sqrt{2}}$$

$$\omega_{uv} = \omega_v \sqrt{\sqrt[k]{2} - 1} < \omega_v$$

Ukupno **pojačanje raste** sa k-tim stepenom!

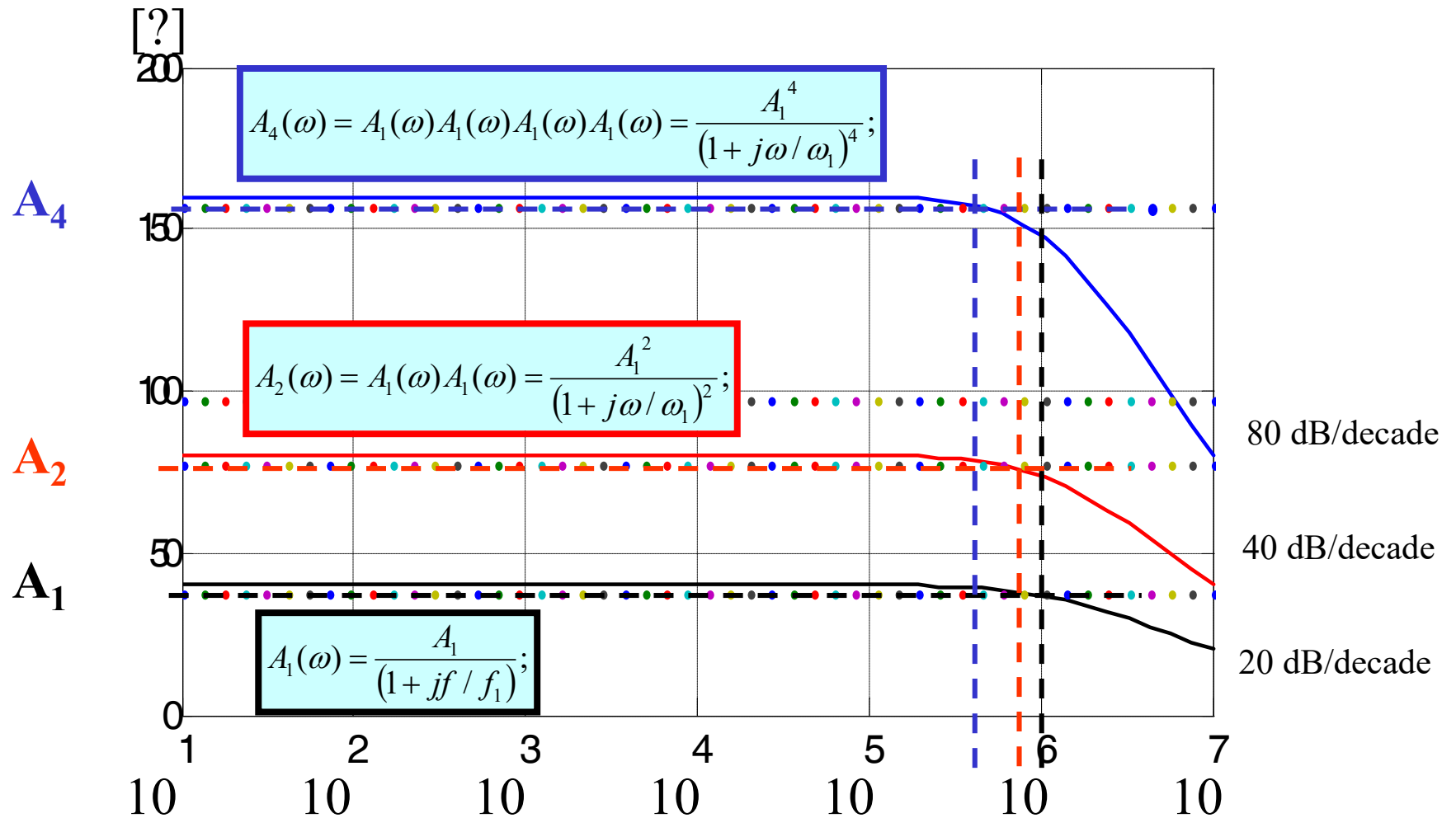
Ukupni **propusni opseg se sužava - smanjuje!**

Ukupni propusni opseg manji je od najužeg  
propusnog opsega pojedinačnog pojačavača

Realni:

## Osobine višestepenh pojačavača

# Ukupno pojačanje pri VF za 1, 2 i 4 stepena



27. novembar 2018.

Višestepeni pojačavači

$f_4$   $f_2$   $f_1$

## Realni:

### Osobine višestepenih pojačavača

---

Pojedini pojačavački stepeni mogu biti upotrebljeni za prilagodjenje (naponsko ili strujno) sa generatorom i/ili potrošačem izmedju kojih treba da se nadje osnovni pojačavač čija je glavna namena pojačanje napona.

Stepen sa zajedničkim emitorom/sorsom ima zadatak da obezbedi potrebno naponsko pojačanje, dok se stepen ZB/ZG koristi za strujno a ZC/ZD za naponsko prilagođenje.

**Kolike su vrednosti ulazne/izlazne otpornosti ZB/ZG i ZC/ZD?**

Videti petu i šestu nedelju predavanja

Višestepeni pojačavači

27. novembar 2018.

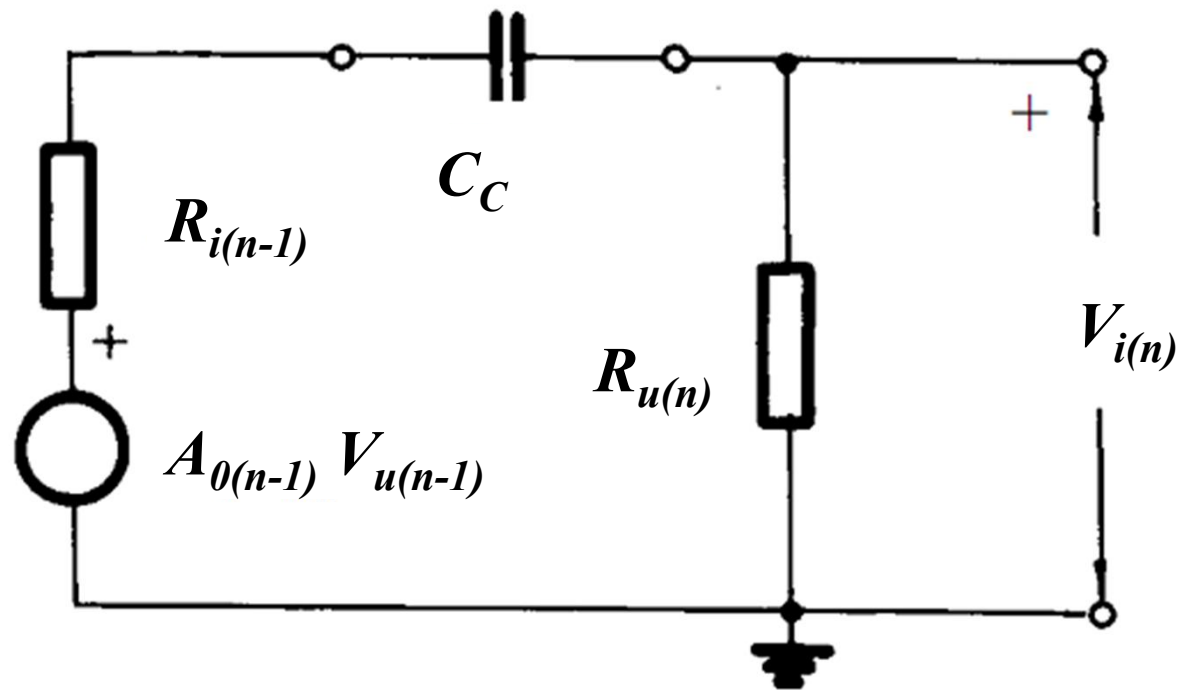


**Realni:**

## Osobine višestepenih pojačavača

---

**Kapacitivna sprega: povezuje  $R_{i(n-1)}$  i  $R_{u(n)}$  preko  $C$  zato se zove i RC sprega**



## Realni:

### RC sprega

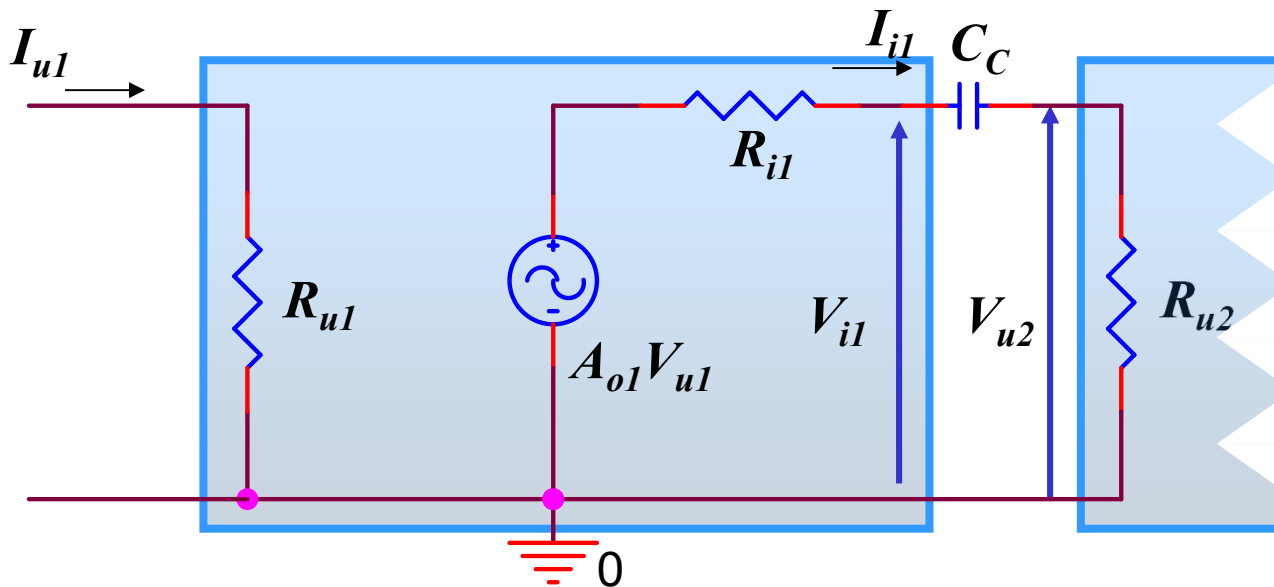
---

Uticaj elemenata za spregu na amplitudsku karakteristiku

Razmotrimo spregu između 1. i 2. stepena.

Pri NF reaktansa kondenzatora nije zanemariva.

Za  $f=0$ ,  $X_{Cs} \rightarrow \infty$ ; prekid za DC

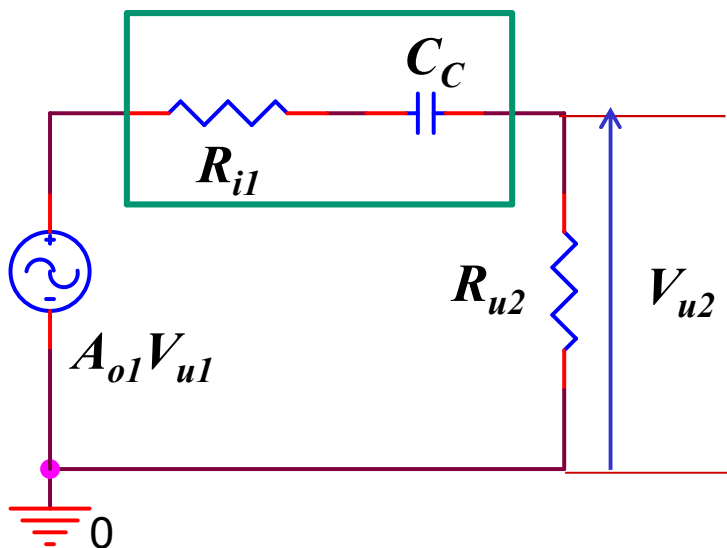


Realni:

RC sprega

Za one koji žele  
da nauče više

Uticaj elemenata za spregu na amplitudsku  
karakteristiku pri NF



$$A_n = \frac{V_{u2}}{V_{u1}} = A_{o1} \frac{R_{u2}}{R_{i1} + \frac{1}{j\omega C_C} + R_{u2}}$$

$$A_n = A_{o1} \frac{j\omega C_C R_{u2}}{1 + j\omega C_C (R_{i1} + R_{u2})}$$

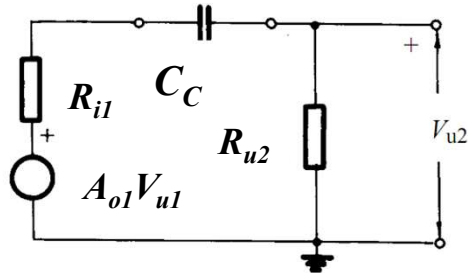
$$A_n = A_{o1} \frac{R_{u2}}{(R_{i1} + R_{u2})} \frac{j\omega C_C (R_{i1} + R_{u2})}{1 + j\omega C_C (R_{i1} + R_{u2})}$$

$$A_n = A_0 \frac{j\omega \tau_C}{1 + j\omega \tau_C}$$

$$A_n = A_0 \frac{j\omega / \omega_n}{1 + j\omega / \omega_n}$$

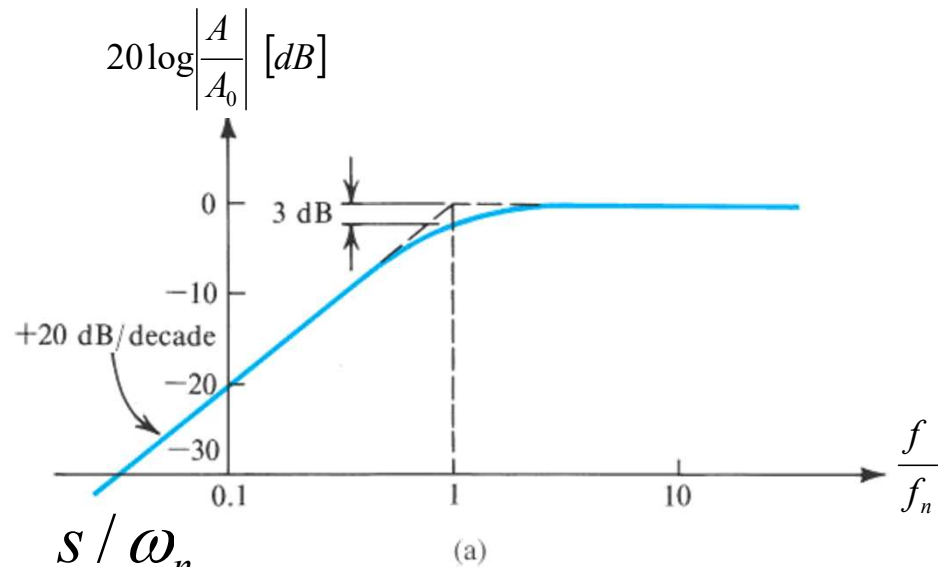
## Realni:

### RC sprega



$$\omega_n = \frac{1}{C_C (R_{i1} + R_{u2})}$$

$$A(f) = A_0 \frac{j \frac{f}{f_n}}{1 + j \frac{f}{f_n}}$$



$$A(s) = A_0 \frac{j\omega / \omega_n}{1 + j\omega / \omega_n} = A_0 \frac{s / \omega_n}{1 + s / \omega_n}$$

**Doprinos kondenzatora za spregu odgovara doprinosu filtra propusnika visokih frekvencija.**

**Realni:**

## RC sprega

Uticaj elemenata za spregu na amplitudsku karakteristiku pri NF

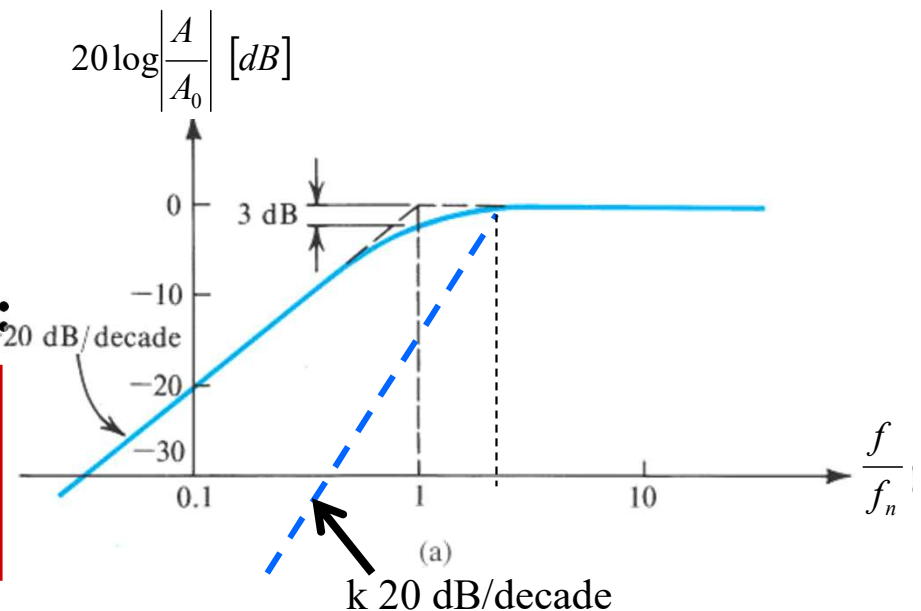
**Pretpostavimo da je  $k$  pojačavača vezano kaskadno i da su pojačavači identični tako da je:**

$$\omega_{n1} = \omega_{n2} = \dots = \omega_{nk} = \omega_n$$

$$A_{un} = \left( A_0 \frac{j\omega / \omega_n}{1 + j\omega / \omega_n} \right)^k$$

**Tada će granična frekvencija biti:**

$$\omega_{un} = \frac{\omega_n}{\sqrt{k\sqrt{2}-1}} > \omega_n$$

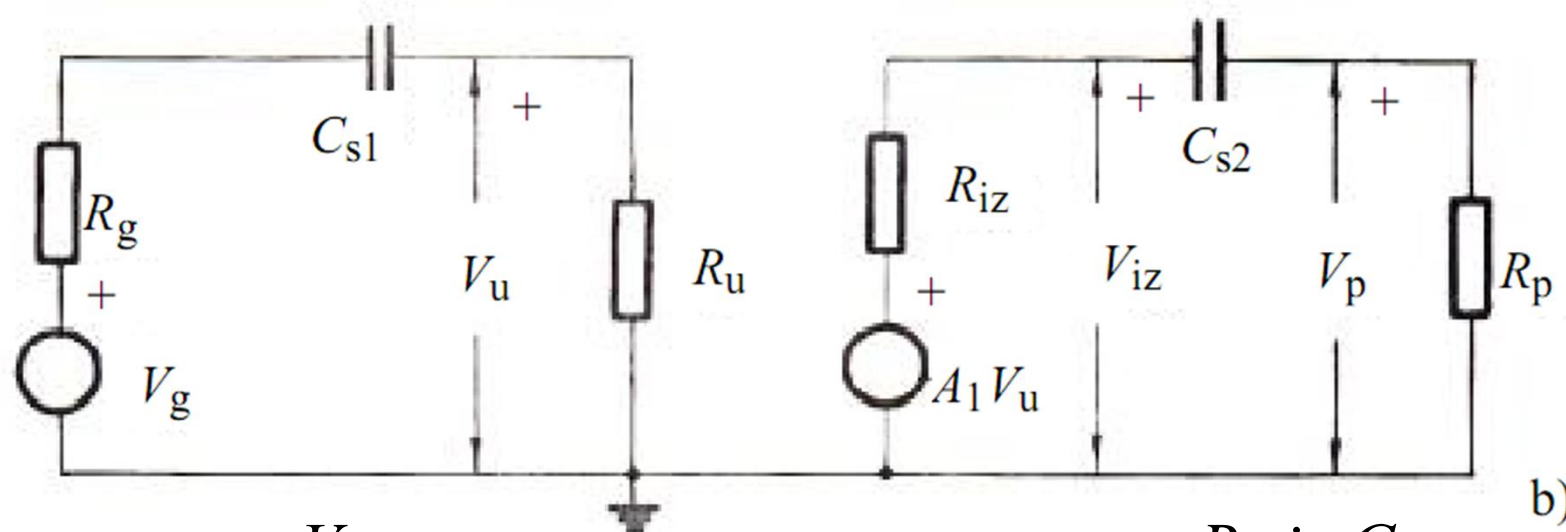


Realni:

RC sprega

Za one koji žele  
da nauče više

Potrošač priključen za pojačavač preko  $C_{S2}$



$$A_{vn} = \frac{V_p}{V_g} = A_1 \frac{R_u j\omega C_{C1}}{1 + j\omega C_{C1}(R_u + R_g)} \frac{R_p j\omega C_{C2}}{1 + j\omega C_{C2}(R_p + R_i)}$$

$$\tau_{C1} = C_{C1}(R_g + R_u)$$

$$\tau_{C2} = C_{C2}(R_i + R_p)$$

$$A_n = A_1 \frac{j\omega\tau_{C1}}{1 + j\omega\tau_{C1}} \frac{j\omega\tau_{C2}}{1 + j\omega\tau_{C2}}$$

Realni:

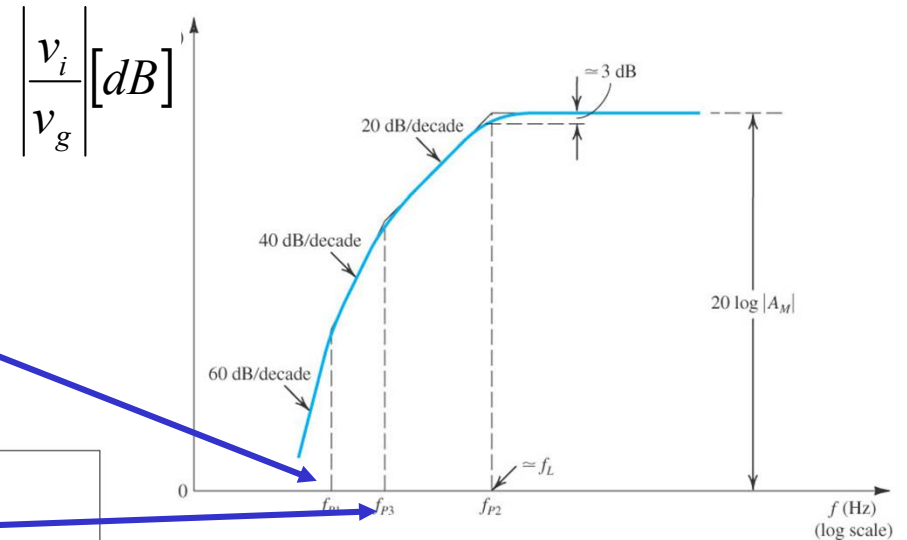
RC sprega

Za one koji žele  
da nauče više

Pojačavač sa **C** u sorsu/emitoru ( $C_S$  ili  $C_E$ )  
na NF

Ima tri pola, dominantni uz  
 $C_S$  ( $C_E$ )

$$\tau_{C1} = C_{C1}(R_g + R_u)$$



$$\tau_{p2} = C_S / g_m \quad \text{MOSFET}$$

$$\tau_{p2} = C_E (r_e + R_B / (\beta + 1)) \approx C_E r_e \quad \text{BJT}$$

Višestepeni pojačavači

27. novembar 2018.

## Realni:

### RC sprega

---

Uticaj elemenata za spregu na amplitudsku karakteristiku pri VF može da se zanemari.

Na VF utiču parazitne kapacitivnosti (Milerov efekat).

Dolazi do izražaja kompleksni oblik  $Z_u$  i  $Z_i$ .

Tranzistori se **ne ponačaju unilaterarno**.- deo signala sa izlaza vraća se ka ulazu

Na  $Z_u$  narednog stepena utiče opterećenje sa izlaza.

Na  $Z_i$  prethodnog stepena utiče  $Z$  iz pobude.

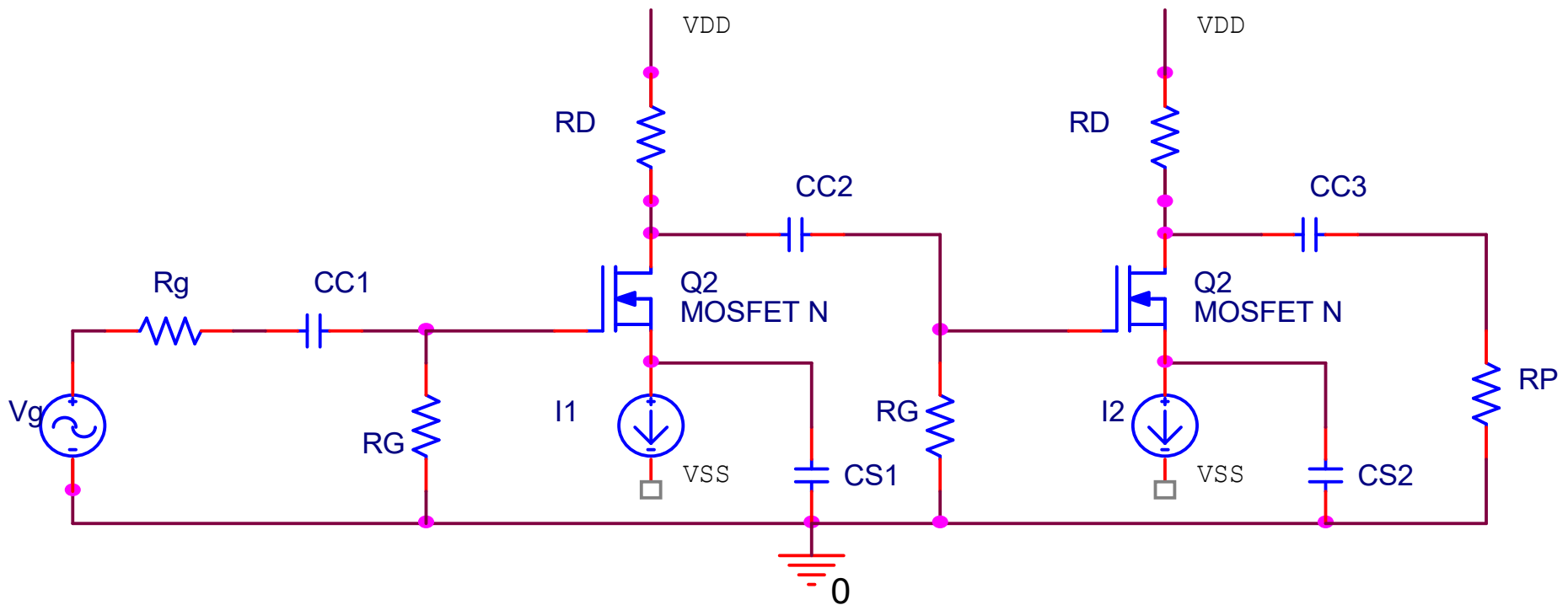
Zato je analiza veoma složena i obavlja se uz pomoć računara.



## RC sprega

**Primer:**

### **Dvostepeni MOSFET pojačavač**

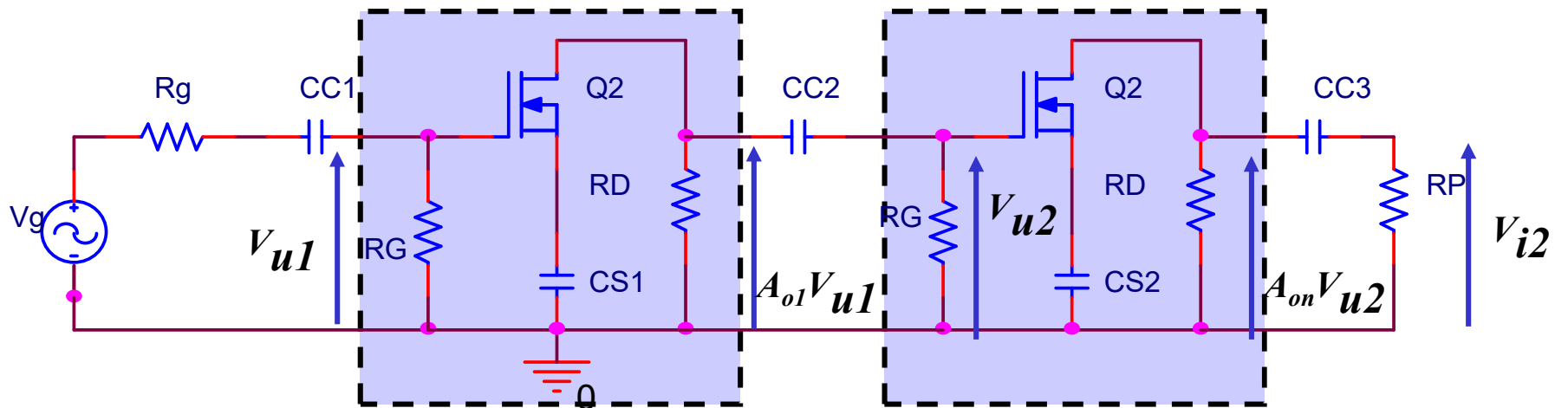


27. novembar 2018.

Višestepeni pojačavači

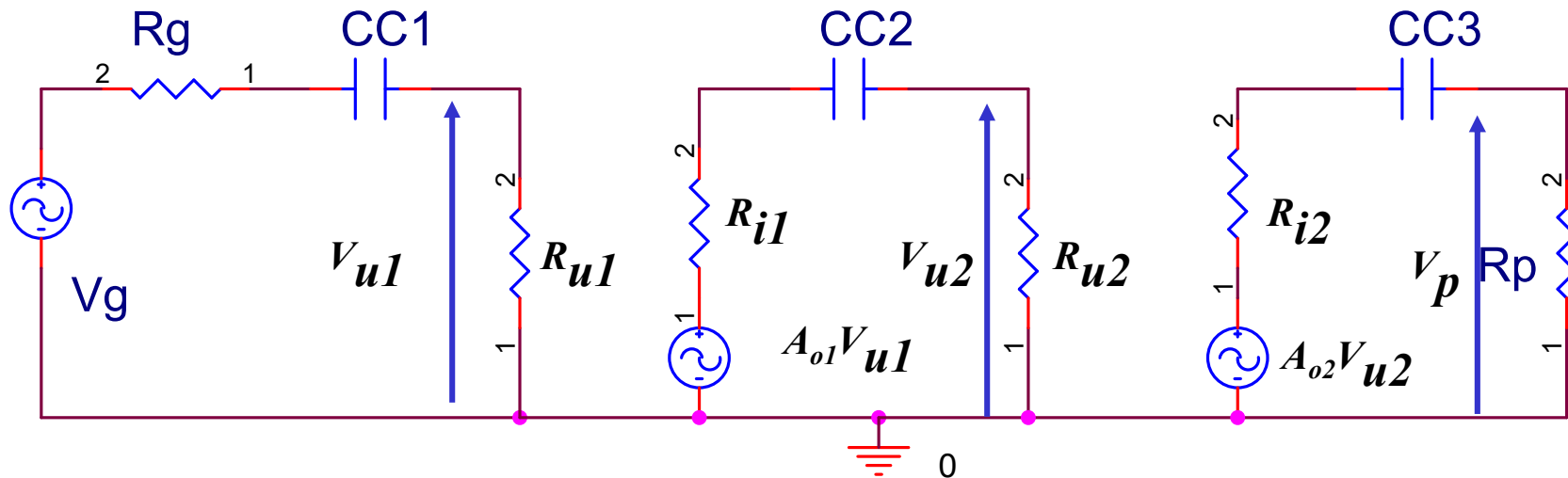
## RC sprega

### Dvostepeni MOSFET pojačavač



## RC sprega

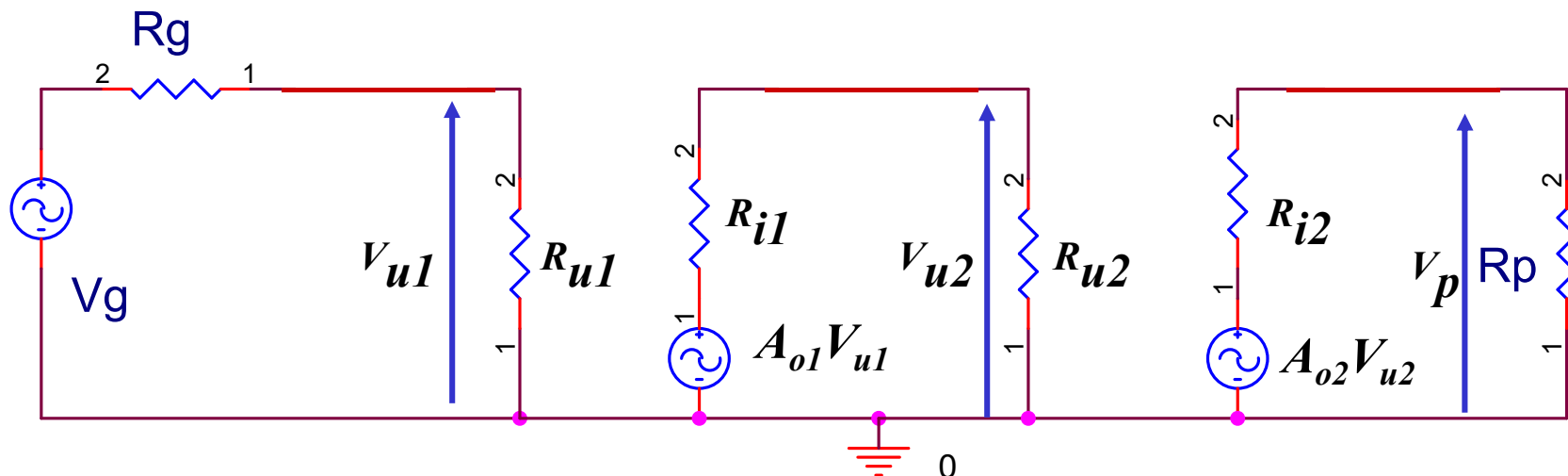
### Dvostepeni MOSFET pojačavač



## RC sprega

### Dvostepeni MOSFET pojačavač

SF



$$A_u = \frac{V_p}{V_g} = \frac{V_p}{V_{u2}} \frac{V_{u2}}{V_{u1}} \frac{V_{u1}}{V_g}$$

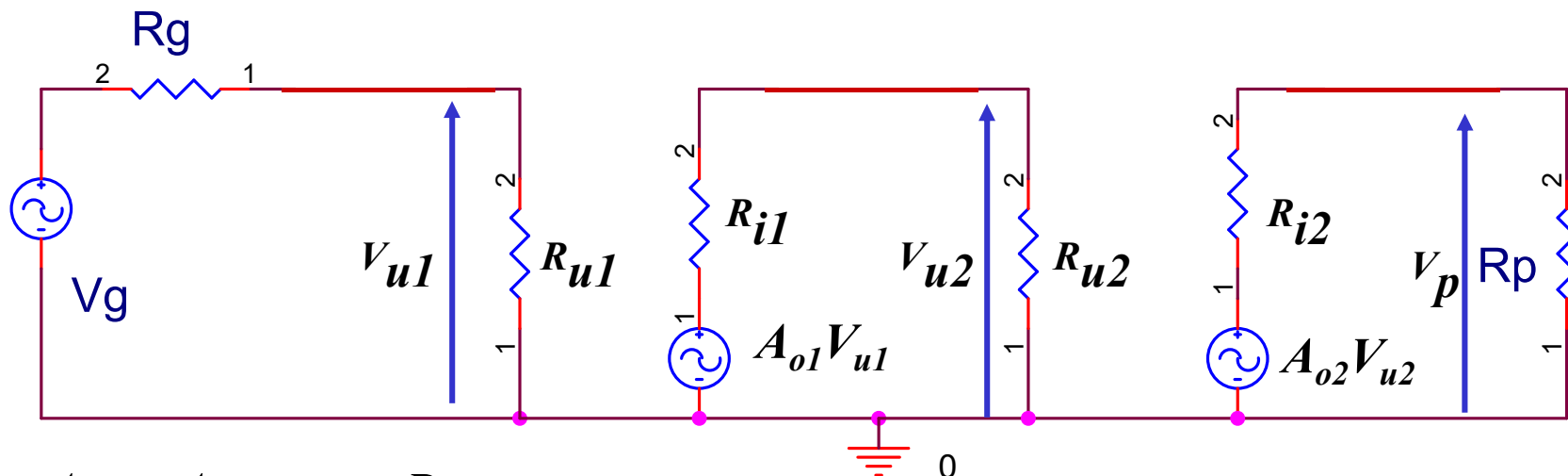
$$A_u = \frac{R_p}{R_p + R_{i2}} A_{o2} \frac{R_{u2}}{R_{u2} + R_{i1}} A_{o1} \frac{R_{u1}}{R_{u1} + R_g} = A_{o1} A_{o2} \frac{R_{u1}}{R_{u1} + R_g} \frac{R_{u2}}{R_{u2} + R_{i1}} \frac{R_p}{R_p + R_{i2}}$$

27. novembar 2018.

Višestepeni pojačavači

## Dvostepeni MOSFET pojačavač

SF



$$A_{o1} = A_{o2} = -g_m R_D$$

$$R_{u1} = R_{u2} = R_G$$

$$R_{i1} = R_{i2} = R_D \parallel r_o \approx R_D$$

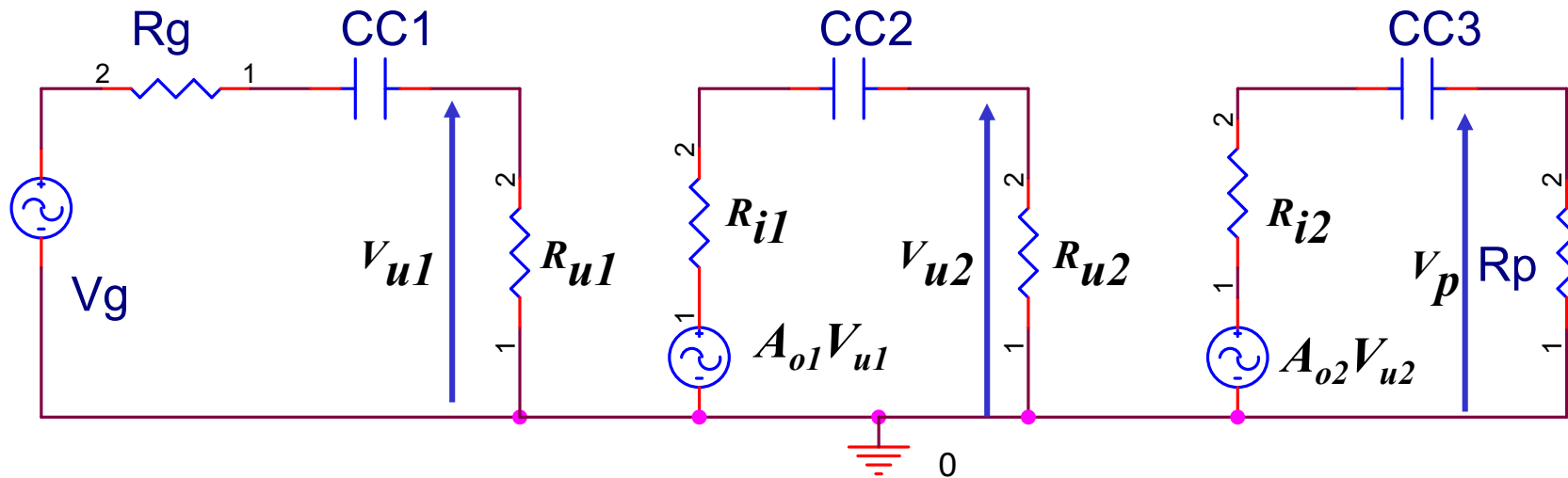
$$A_u = (g_m R_D)^2 \frac{R_G}{R_G + R_g} \frac{R_G}{R_G + R_D} \frac{R_p}{R_p + R_D} \approx (g_m R_D)^2 \quad \text{Za } R_G \gg R_g, R_D$$

$$R_p \gg R_D$$

## RC sprega

### Dvostepeni MOSFET pojačavač

NF



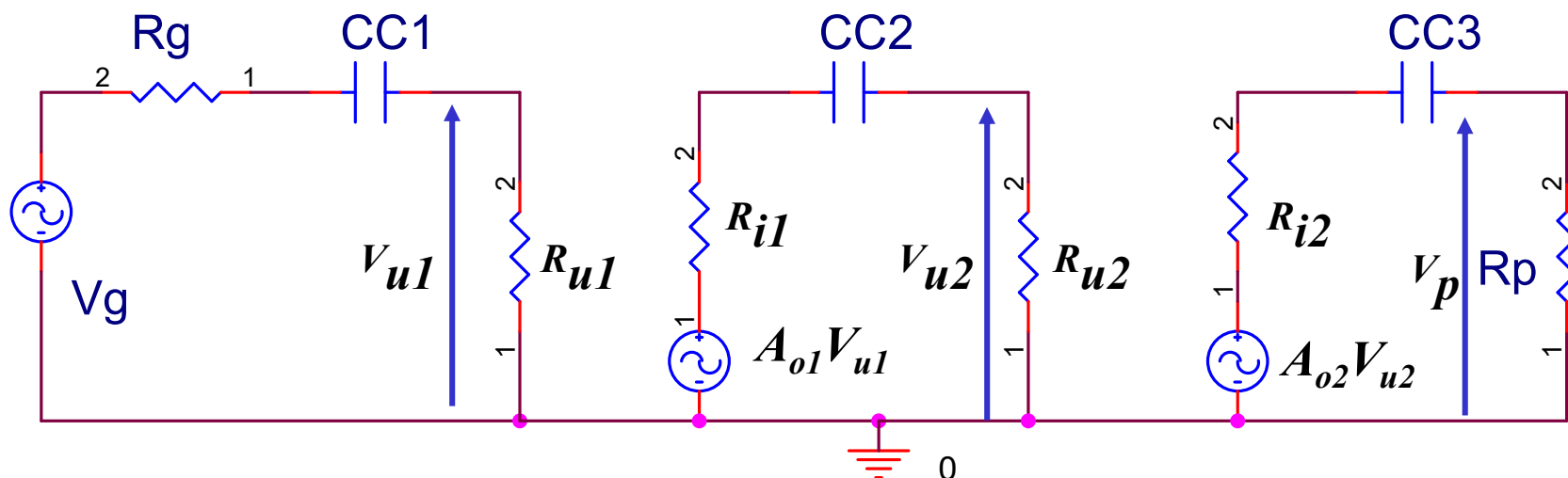
$$A_u = \frac{V_p}{V_g} = \frac{V_p}{V_{u2}} \frac{V_{u2}}{V_{u1}} \frac{V_{u1}}{V_g}$$

$$A_u = \frac{R_{u1}}{R_{u1} + R_g + 1/j\omega C_{c1}} \frac{R_{u2}}{R_{u2} + R_{i1} + 1/j\omega C_{c2}} A_{o1} \frac{R_p}{R_p + R_{i2} + 1/j\omega C_{c3}} A_{o2}$$

## RC sprega

### Dvostepeni MOSFET pojačavač

NF



$$A_u = A_{o1}A_{o2} \frac{j\omega C_{C1}R_{u1}}{1 + j\omega C_{C1}(R_{u1} + R_g)} \frac{j\omega C_{C2}R_{u2}}{1 + j\omega C_{C2}(R_{u2} + R_{i1})} \frac{j\omega C_{C3}R_p}{1 + j\omega C_{C3}(R_p + R_{i2})}$$

$$A_u = A_{o1}A_{o2} \frac{j\omega C_{C1}R_G}{1 + j\omega C_{C1}(R_G + R_g)} \frac{j\omega C_{C2}R_G}{1 + j\omega C_{C2}(R_G + R_D)} \frac{j\omega C_{C3}R_p}{1 + j\omega C_{C3}(R_p + R_D)}$$

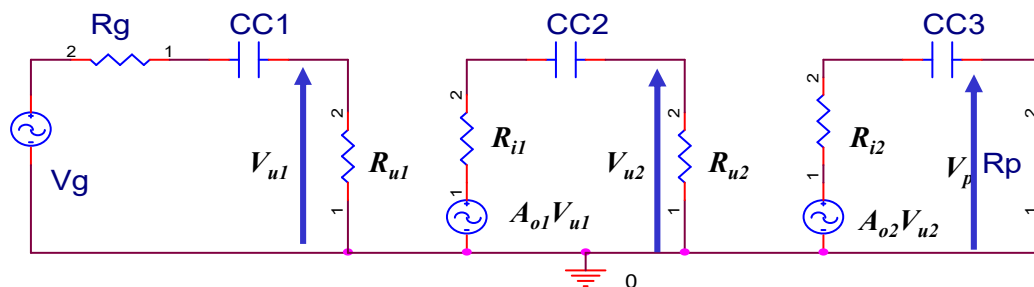
27. novembar 2018.

Višestepeni pojačavači

## RC sprega

### Dvostepeni MOSFET pojačavač

NF



$$A_{o1}(j\omega) = A_{o2}(j\omega) \approx -g_m R_D \frac{j(\omega / \omega_{p2})}{1 + j(\omega / \omega_{p2})}; \quad \omega_{p2} = g_m / C_S;$$

$$C_{C1} = C_{C2} = C_{C3} = C_C$$

$$A_u \approx (g_m R_D)^2 \frac{(j\omega C_C)^3 R_G^2 R_p}{(1 + j\omega C_C R_G)^2} \frac{1}{1 + j\omega C_C (R_p + R_D)} \left( \frac{j(\omega / \omega_{p2})}{1 + j(\omega / \omega_{p2})} \right)^2$$

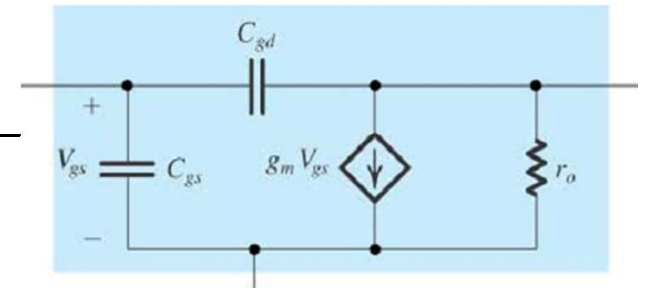
$$A_u = A_{o1} A_{o2} \frac{j\omega C_{C1} R_G}{1 + j\omega C_{C1} (R_G + R_g)} \frac{j\omega C_{C2} R_G}{1 + j\omega C_{C2} (R_G + R_D)} \frac{j\omega C_{C3} R_p}{1 + j\omega C_{C3} (R_p + R_D)}$$



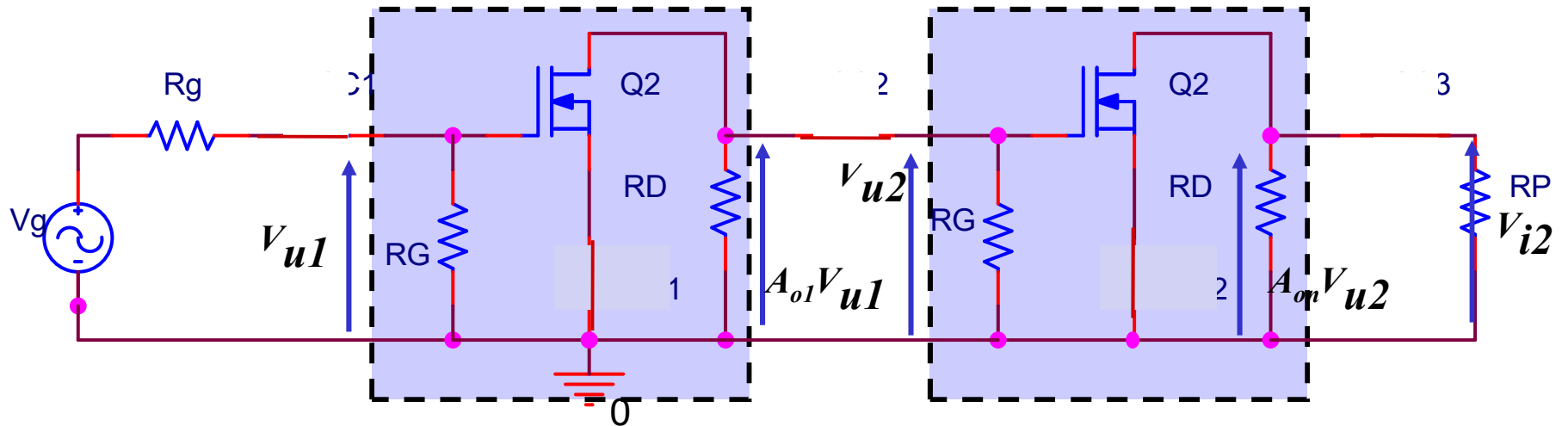
## RC sprega

# Dvostepeni MOSFET pojačavač

VF



Kapacitivnosti za spregu  $C_{C1}$  i  $C_{C2}$  i  $C_S$  predstavljaju kratak spoj na VF.



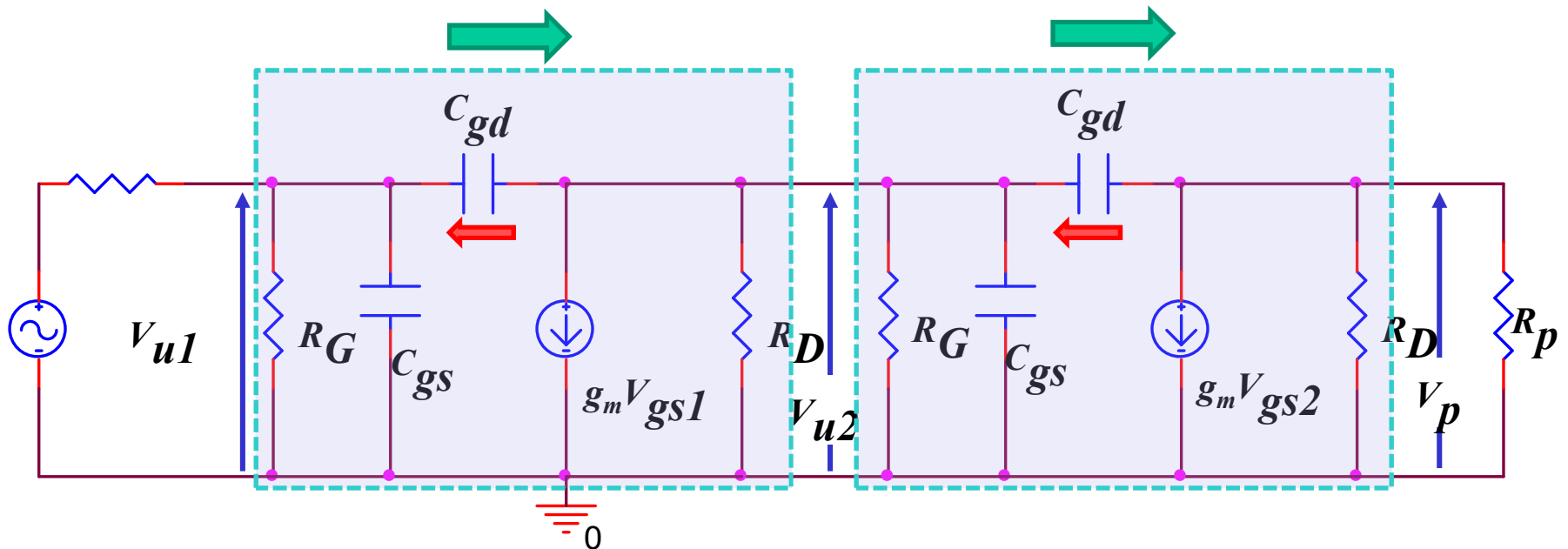
**Dominiraju parazitne kapacitivnosti tranzistora.**

## RC sprega

### Dvostepeni MOSFET pojačavač

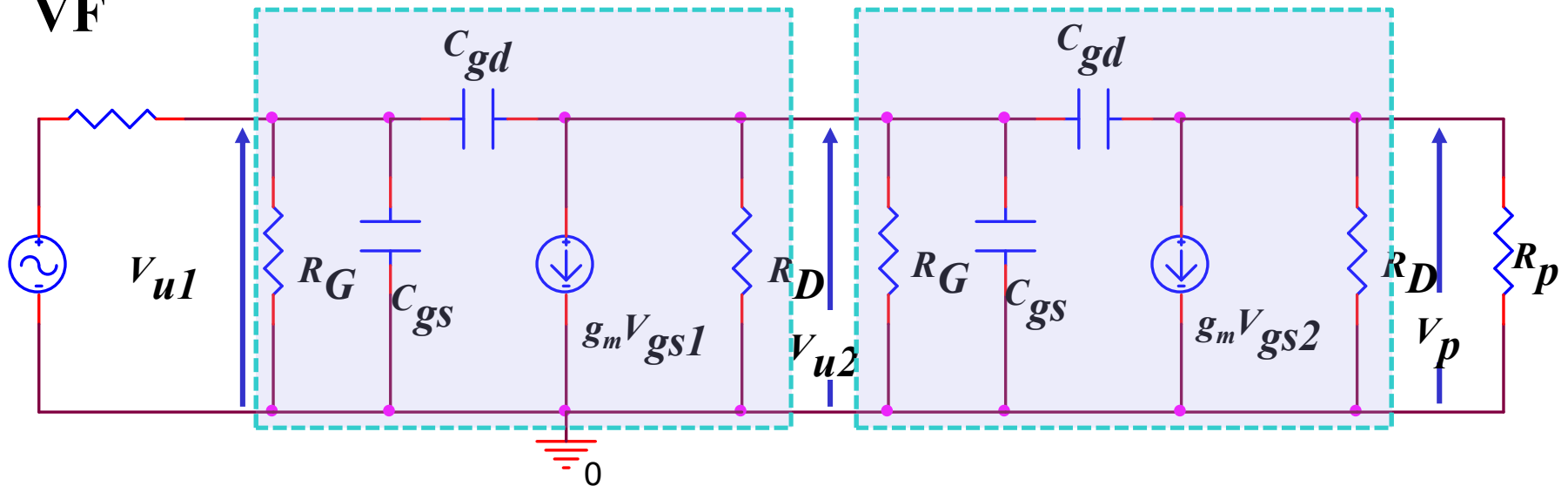
VF

Tranzistor nije unilateralan usled  $C_{gd}$



### Dvostepeni MOSFET pojačavač

VF

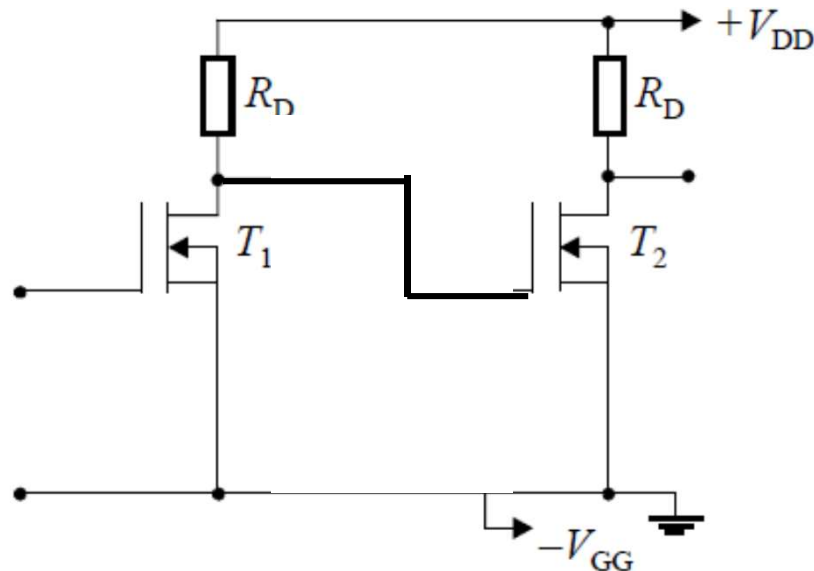


Analiza na VF je složena jer tranzistori nisu unilateralni, tako da  $Z_u$  zavisi od opterećenja na izlazu, a  $Z_i$  od opterećenja na ulazu.

---

**Direktna sprega - primena u IC****Problemi – izazovi**

- polarizacija aktivne komponente u narednom stepenu (radna tačka u aktivnoj oblasti, a jednosmerni signal na ulazu je veliki jer je definisan radnom tačkom na izlazu prethodnog stepena).



## Direktna sprega - primena u IC

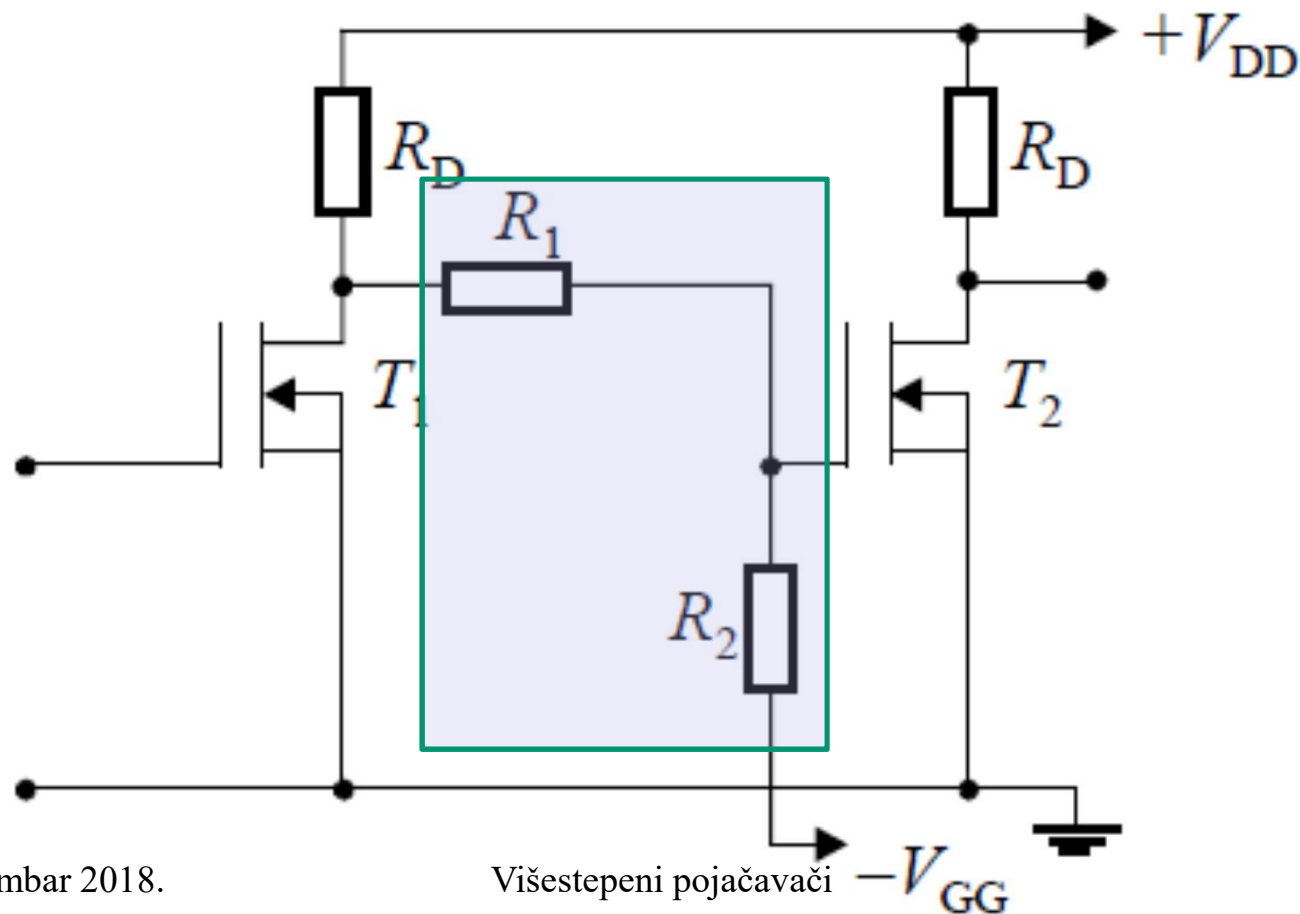
### Problemi – izazovi

- nestabilnost jednosmernih nivoa na izlazu usled međusobne zavisnosti DC nivoa (svi su u vezi sa svima).

**Ključno je stabilizovati prvi stepen jer ga ostali “prate” i pojačavaju efekte**

## Dvostepeni ZS

Velika razlika između napona na drejnu prvog i gejtu drugog “skida” se preko razdelnika napona



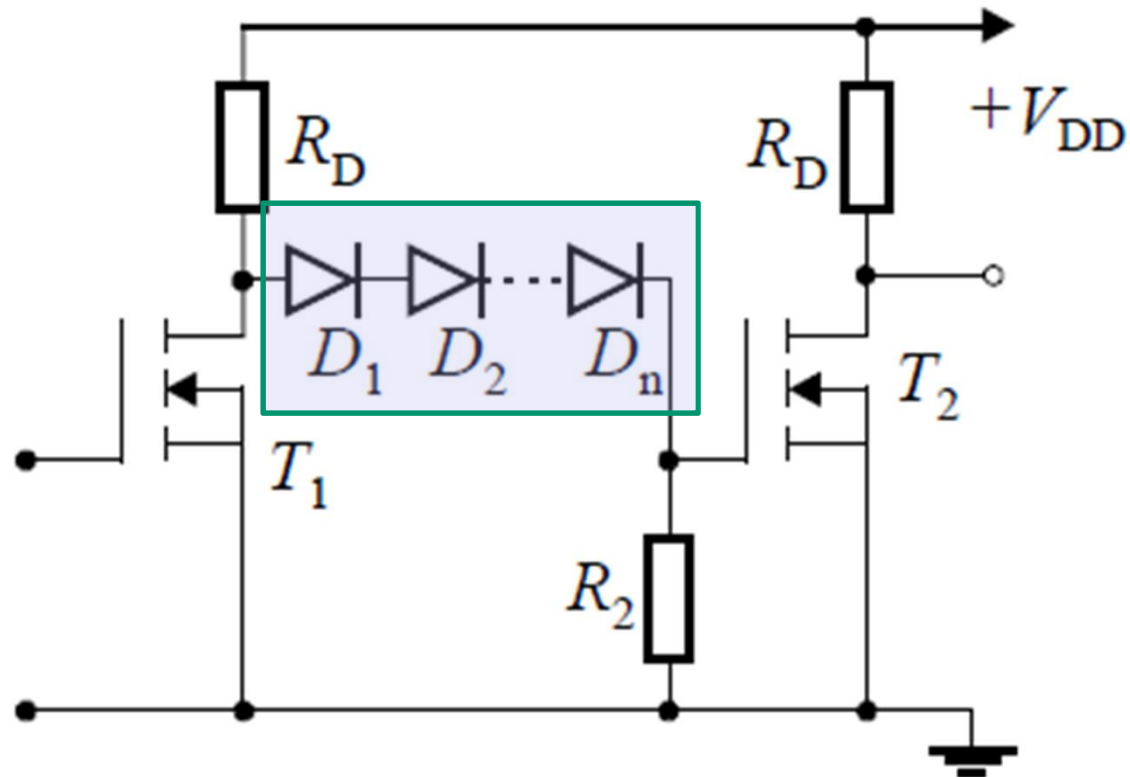
27. novembar 2018.

Višestepeni pojačavači  $-V_{GG}$

Direktna sprega

Dvostepeni ZS

Velika razlika između napona na drejnu prvog i gejtu drugog “skida” se ubacivanjem rednih dioda



**Uobičajeno je da se koristi dinamička otpornost MOS tranzistora umesto R.**

**U CMOS IC, RT svakog stepena (grane) podešava se preko izvora referentnih napona i struja.**

**Izvore konstantne struje smo pominjali.**

**Pojedinim granama podešava se RT korišćenjem složenijih *strujnih ogledala*.**

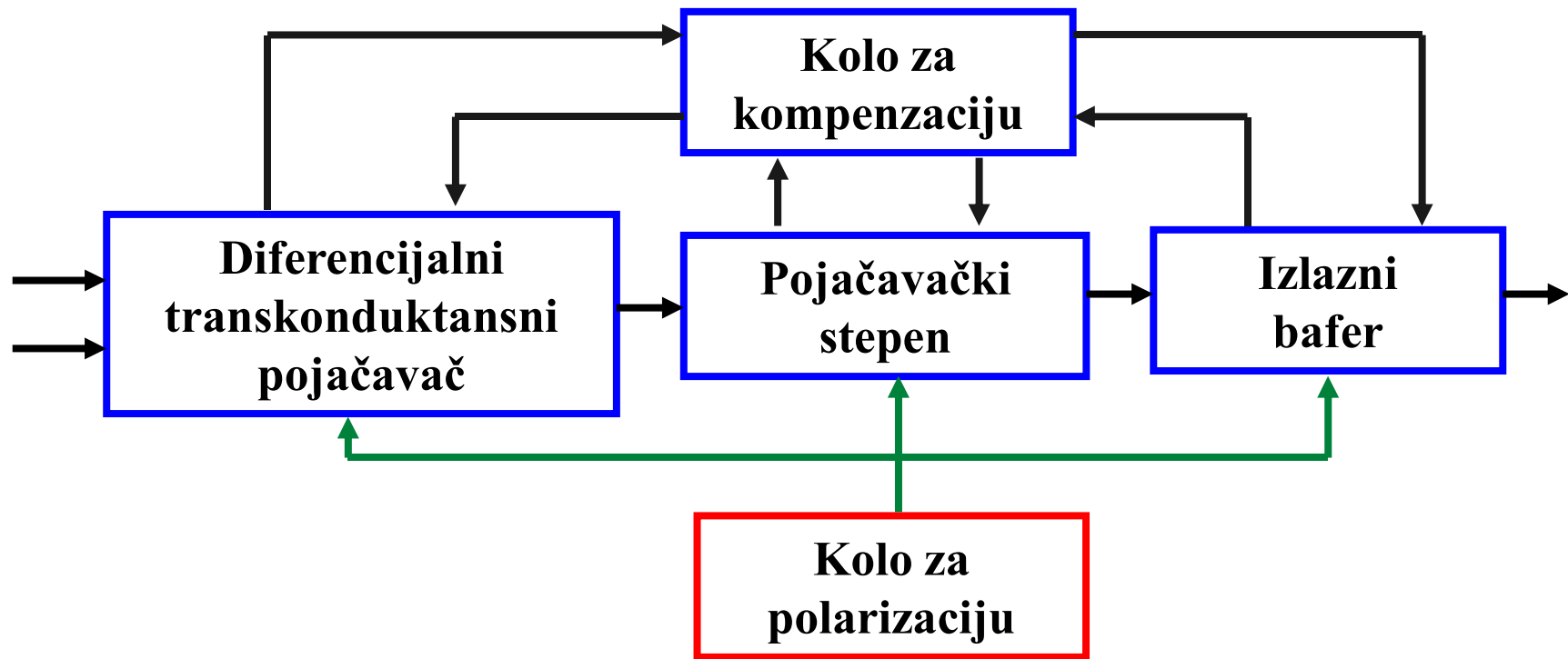
**Za definisanje referentne struje i  $RT^*$  neophodno je obezbediti polarizaciju preko izvora referentnog napona.**

**(\* Npr. za ZG kod kaskodnih pojačavača)**



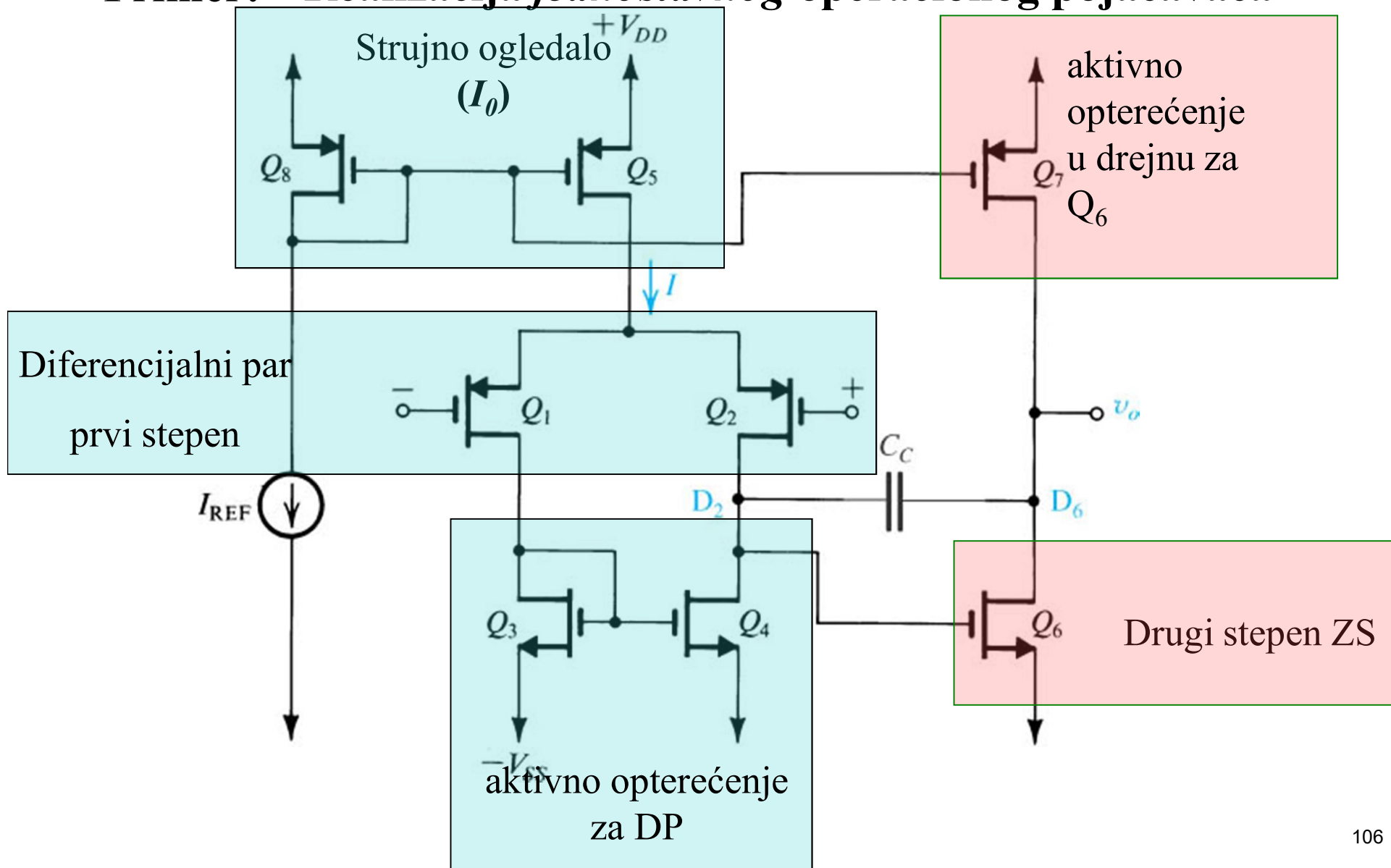
## Direktna sprega

### Blok šema operacionog pojačavača



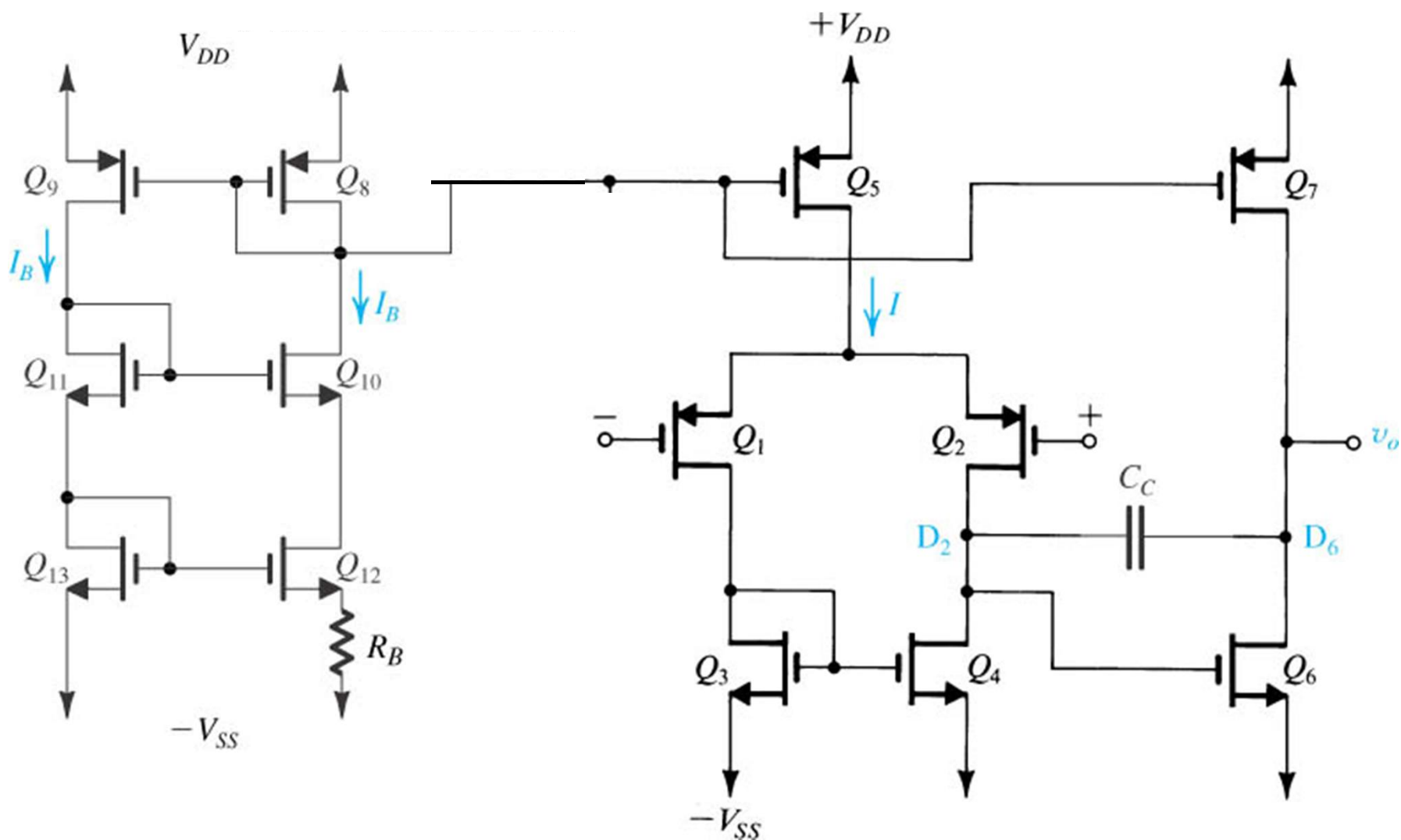
## Direktna sprega

### Primer: Realizacija jednostavnog operacionog pojačavača



## Direktna sprega

### Primer realizacije operacionog pojačavača



27. novembar 2018.

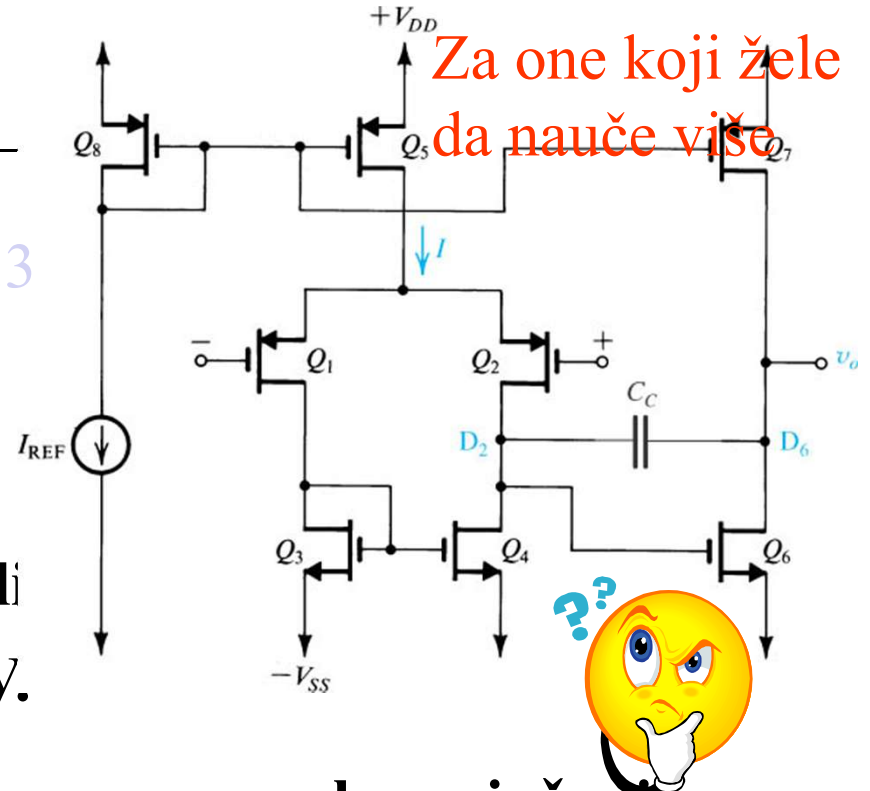
Višestepeni pojačavači

## Domaći 8.3: Realizacija sa MOST

- U kolu sa slike upotrebljeni su tranzistori sa  $\mu_n C_{ox} = 160 \mu\text{A}/\text{V}^2$ ,  $V_{tn} = 0.7\text{V}$ ,  $\mu_p C_{ox} = 40 \mu\text{A}/\text{V}^2$ ,  $V_{tp} = -0.8\text{V}$ ,  $V_{An} = -V_{Ap} = -10\text{V}$ .

Dimenzije tranzistora date su u tabeli  
 Poznato je  $I_{REF} = 90 \mu\text{A}$ ,  $V_{DD} = V_{SS} = 2.5\text{V}$ .

E7.3



Dopuniti podatke u Tabeli i naći ukupno naponsko pojačanje.

Sugestija: Najpre odrediti pojačanje svakog stepena posebno.

	Q <sub>1</sub>	Q <sub>1</sub>	Q <sub>3</sub>	Q <sub>4</sub>	Q <sub>5</sub>	Q <sub>6</sub>	Q <sub>7</sub>	Q <sub>8</sub>
W/L	20/0.8	20/0.8	5/0.8	5/0.8	40/0.8	10/0.8	40/0.8	40/0.8
I <sub>D</sub> ( $\mu\text{A}$ )								
V <sub>GS</sub> (V)								
g <sub>m</sub> (mA/V)								
r <sub>o</sub> (k $\Omega$ )								



### Šta smo naučili?

- **Zašto se koriste višestepeni pojačavači?**
  - Električna šema, princip rada i osobine diferencijalnog pojačavača (MOS ili BJT).
  - Višestepeni pojačavač napona: blok šema, ukupno pojačanje opterećenog pojačavača pobuđenog iz realnog izvora.
  - Frekvencijske karakteristike višestepenih pojačavača sa RC spregom.

Na web adresi <http://leda.elfak.ni.ac.rs>

> EDUCATION > ELEKTRONIKA

slajdovi u pdf formatu

## Diferencijalni i višestepeni pojačavači



### Ispitna pitanja?

- 1. Varijante realizacije diferencijalnih pojačavača (ulazno izlazni priključci, polarizacija i dinamičko opterećenje)**
- 2. Diferencijalno pojačanje ulaznih signala diferencijalnih pojačavača (MOS ili BJT).**
- 3. Pojačanje srednje vrednosti ulaznih signala diferencijalnih pojačavača (MOS ili BJT).**
- 4. Parametri diferencijalnih pojačavača (CMRR, naponski ofset, PSRR, uzroci efekti i korekcija)**
- 5. Naponsko pojačanje m-tog pojačavača u kaskadnoj vezi.**
- 6. Načini realizacije kola za spregu pojačavača.**
- 7. Ukupno naponsko pojačanje opterećenog dvostepenog pojačavača sa zajedničkim sorsom povezanih preko kondenzatora za spregu, pobuđen iz realnog izvora.**
- 8. Frekvencijske karakteristike dvostepenog pojačavača sa zajedničkim sorsom povezanih preko kondenzatora za spregu.**

## Višestepeni pojačavači

---

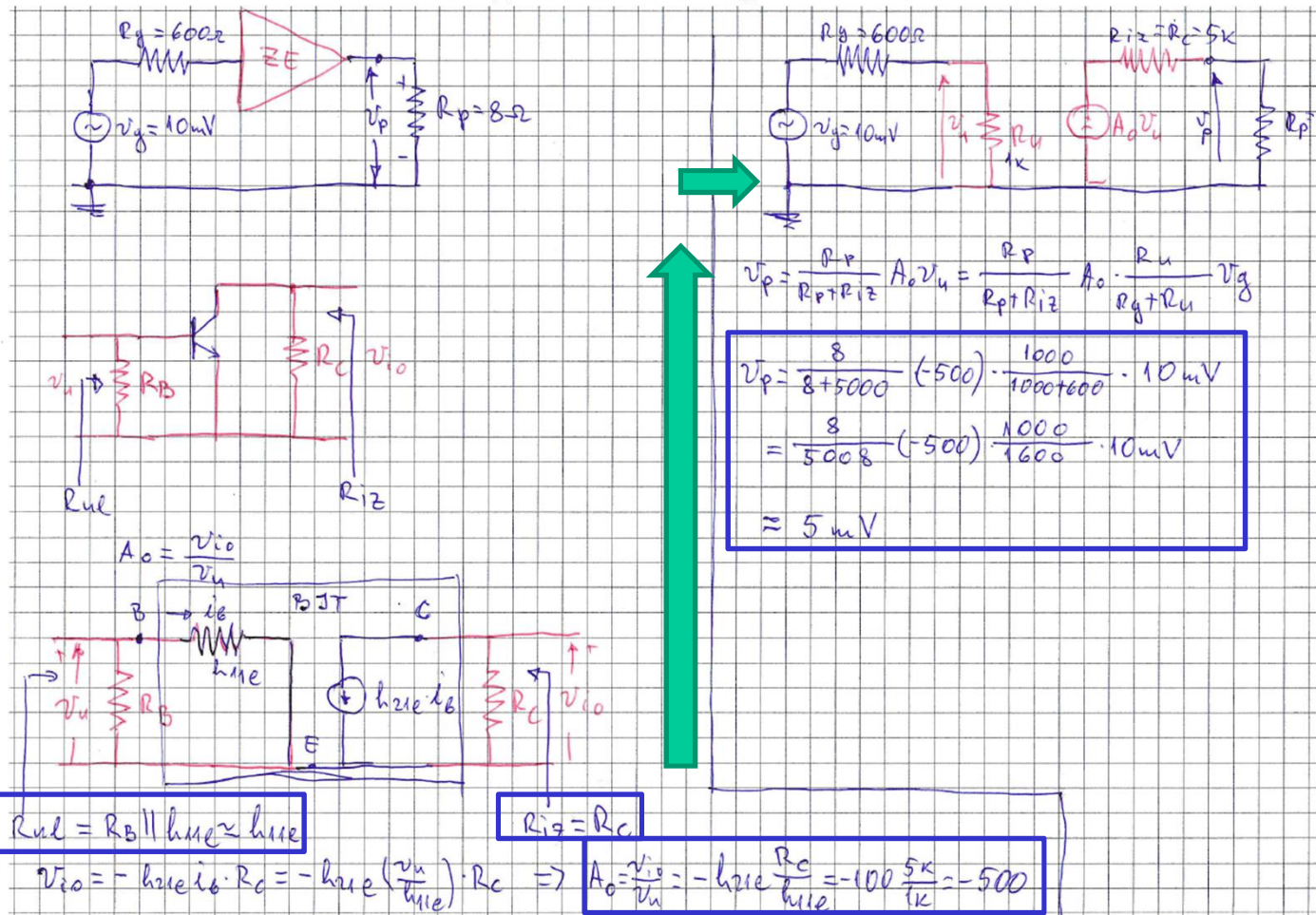
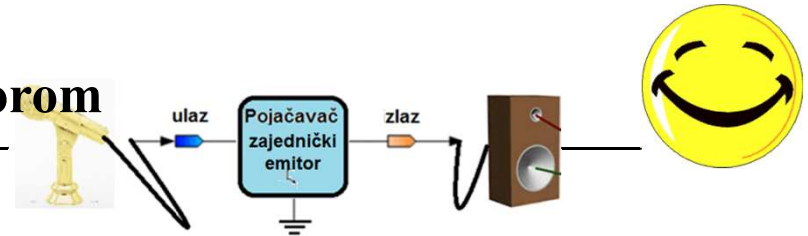
**Sledećeg časa**

**Pojačavači sa negativnom povratnom spregom**

## 2. Pojačavač sa zajedničkim emitorom

### Rešenje Domaći 7.1:

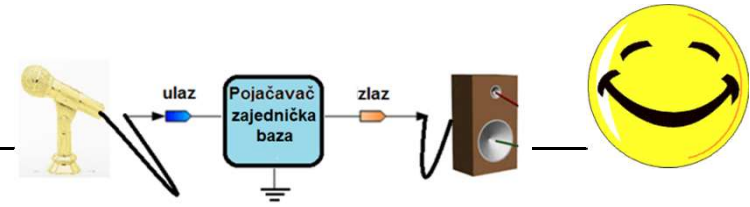
Izračunati napon na potrošaču od  $R_p=8\Omega$  pojačavača sa zajedničkim emitorom čiji su parametri:  $R_C=5k$ ,  $R_B=100k$ ,  $h_{11E}=1k$ ,  $h_{12E}=0$ ,  $h_{21E}=100$ ,  $h_{22E}=0$ , ako je pobuđen iz generatora  $V_g=10mV$  i  $R_g=600\Omega$ .



21

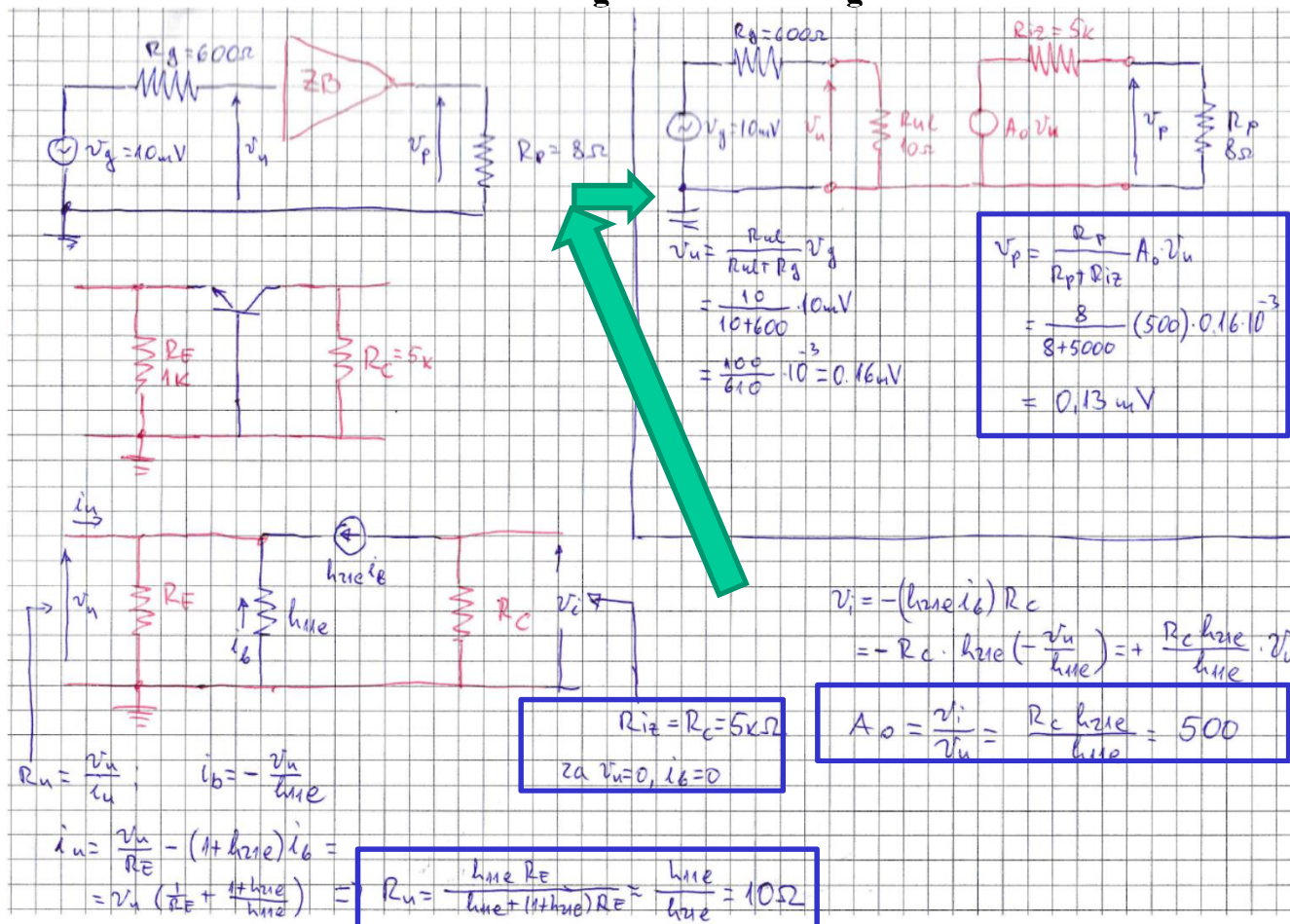


### 3. Pojačavač sa zajedničkom bazom



## Rešenje Domaći 7.2:

Izračunati napon na potrošaču od  $R_p=8\Omega$  pojačavača sa zajedničkim emitorom čiji su parametri:  $R_C=5k$ ,  $R_B=1k$ ,  $h_{11E}=1k$ ,  $h_{12E}=0$ ,  $h_{21E}=100$ ,  $h_{22E}=0$ , ako je pobuđen iz generatora  $V_g=10mV$  i  $R_g=600\Omega$ .



## 4. Pojačavač sa zajedničkim kolektorom



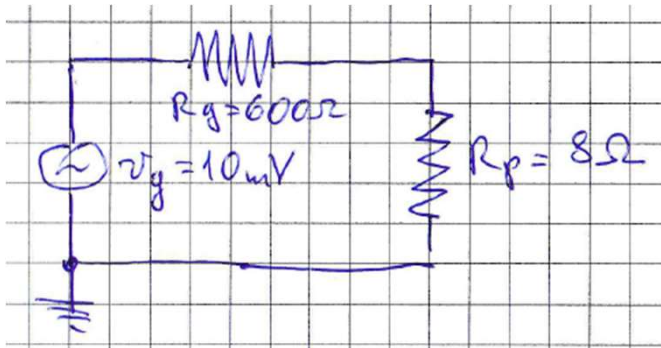
### Rešenje domaći 7.3:

Izračunati napon na potrošaču od  $R_p=8\Omega$  ako je pobuđen iz generatora

$V_g=10\text{mV}$  i  $R_g=600\Omega$  u slučaju da je povezan:



a) Direktno;



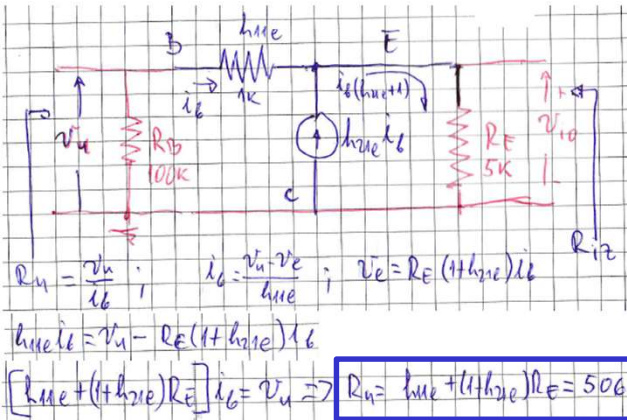
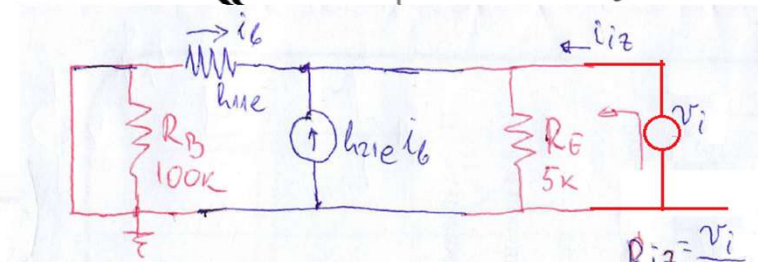
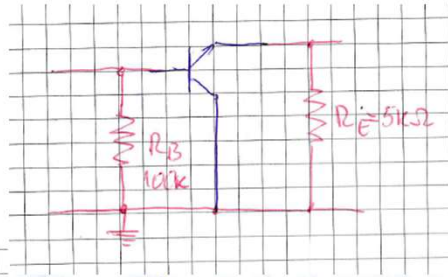
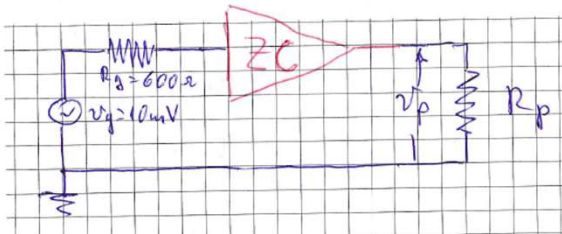
$$v_p = \frac{R_p}{R_p + R_g} v_g = \frac{8}{8 + 600} \cdot 10 \text{ mV}$$
$$v_p = \frac{8}{608} \cdot 10 \text{ mV} = 0,13 \text{ mV}$$



## 4. Pojačavač sa zajedničkim kolektorom

**Rešenje domaći 7.3:** Izračunati napon na potrošaču od  $R_p=8\Omega$  ako je pobuđen iz generatora  $V_g=10\text{mV}$  i  $R_g=600\Omega$  u slučaju da je povezan:

- b) preko pojačavača sa zajedničkim kolektorom čiji su parametri:  $R_E=5\text{k}$ ,  $R_B=100\text{k}$ ,  $h_{11E}=1\text{k}$ ,  $h_{12E}=0$ ,  $h_{21E}=100$ ,  $h_{22E}=0$ ;



$$A_o = \frac{v_{io}}{v_u}$$

$$v_{io} = (h_{21E} + 1) i_b \cdot R_E$$

$$v_{io} = (h_{21E} + 1) \frac{v_u - v_{io}}{h_{11E}} R_E$$

$$h_{11E} v_{io} = (h_{21E} + 1) R_E v_u - (h_{21E} + 1) R_E v_{io}$$

$$v_{io} [h_{11E} + (h_{21E} + 1) R_E] = (h_{21E} + 1) R_E v_u$$

$$i_{iz} = \frac{v_i}{R_E} - (1 + h_{21E}) i_b$$

$$i_b = \frac{v_i}{h_{11E}}$$

$$i_{iz} = \frac{v_i}{R_E} - (1 + h_{21E}) \left( \frac{v_i}{h_{11E}} \right)$$

$$= v_i \left[ \frac{1}{R_E} + \frac{(1 + h_{21E})}{h_{11E}} \right] = \frac{h_{11E} + (1 + h_{21E}) R_E}{h_{11E} R_E}$$

$$R_u = h_{11E} + (1 + h_{21E}) R_E = 506\text{k}\Omega$$

$$\frac{v_{io}}{v_u} = \frac{(h_{21E} + 1) R_E}{h_{11E} + (h_{21E} + 1) R_E} = \frac{101 \cdot 5\text{k}}{1\text{k} + 101 \cdot 5\text{k}}$$

$$R_{iz} = \frac{v_i}{i_{iz}} = \frac{h_{11E} R_E}{h_{11E} + (1 + h_{21E}) R_E} \approx 10\Omega$$

$$A_{io} = \frac{505\text{k}}{506\text{k}} = 0.998 \approx 1$$

21. novembar 2017.

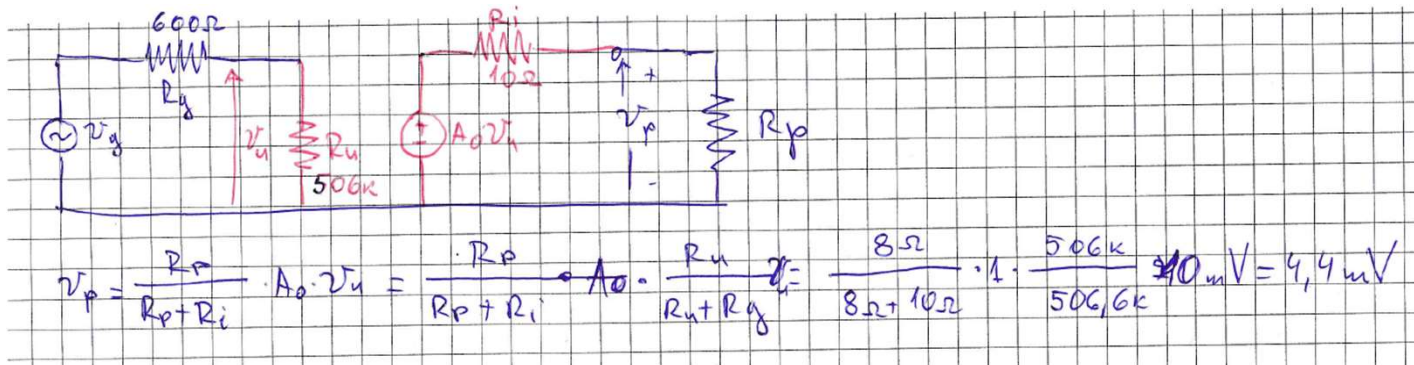
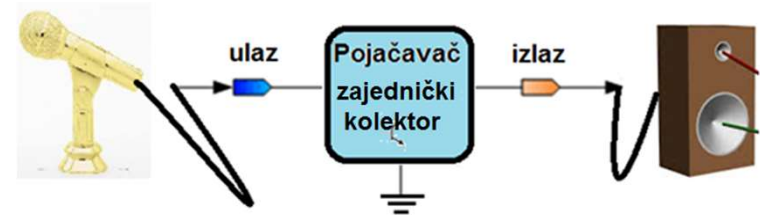


## 4. Pojačavač sa zajedničkim kolektorom



**Rešenje domaći 7.3 (nastavak):** Izračunati napon na potrošaču od  $R_p=8\Omega$  ako je pobuđen iz generatora  $V_g=10\text{mV}$  i  $R_g=600\Omega$  u slučaju da je povezan:

- b) preko pojačavača sa zajedničkim kolektorom čiji su parametri:  $R_E=5\text{k}$ ,  $R_B=100\text{k}$ ,  $h_{11E}=1\text{k}$ ,  $h_{12E}=0$ ,  $h_{21E}=100$ ,  $h_{22E}=0$ ;

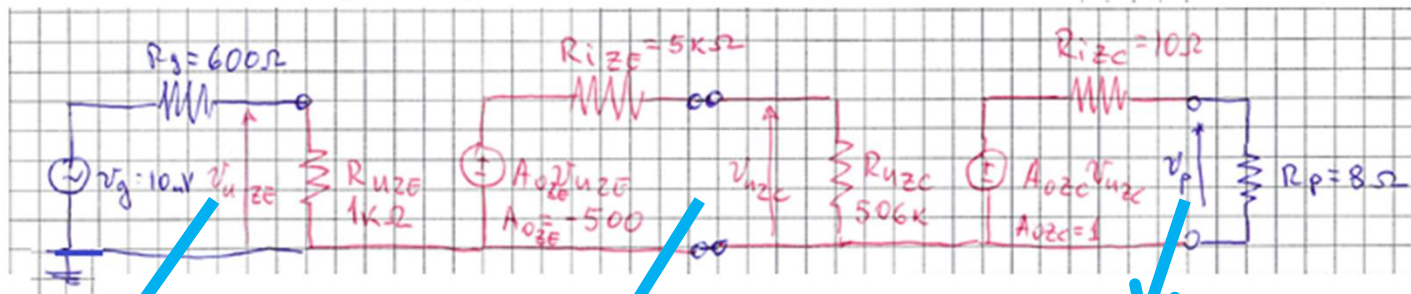
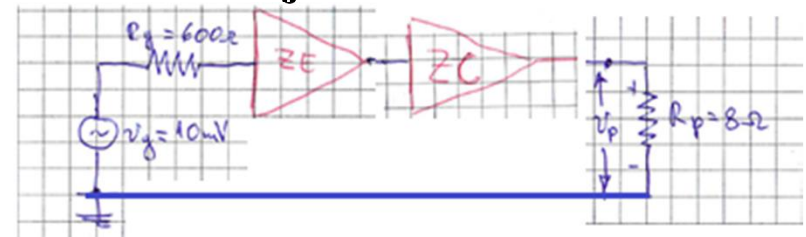


## 4. Pojačavač sa zajedničkim kolektorom



**Rešenje domaći 7.3 (nastavak):** Izračunati napon na potrošaču od  $R_p=8\Omega$  ako je pobuđen iz generatora  $V_g=10\text{mV}$  i  $R_g=600\Omega$  u slučaju da je povezan:

- c) preko kaskadne veze pojačavača sa zajedničkim emitorom iz domaćeg zadatka 7.1 (ulaz vezan za mikروفon) i pojačavača sa zajedničkim kolektorom iz tačke b) (izlaz vezan za zvučnik,  $R_p$ ).



$$v_{uze} = \frac{R_{uze}}{R_{uze} + R_g} v_g$$

$$= \frac{1k}{1k + 0.6k} 10\text{mV} = 6,25\text{mV}$$

$$= 6,25\text{mV}$$

$$v_{uzc} = \frac{R_{uzc}}{R_{uzc} + R_{ize}} A_{oze} v_{uze}$$

$$= \frac{50k}{50k + 5k} \cdot (-500) \cdot 6,25\text{mV}$$

$$\approx -3\text{V}$$

$$v_p = \frac{R_p}{R_p + R_{izc}} A_{ozc} v_{uzc}$$

$$= \frac{8\Omega}{8\Omega + 10\Omega} 1 \cdot 3\text{V}$$

$$= -1,375\text{V}$$

$$A = \frac{v_p}{v_g}$$

$$= -\frac{1375}{10}$$

$$= -137,5 \text{ V/V}$$

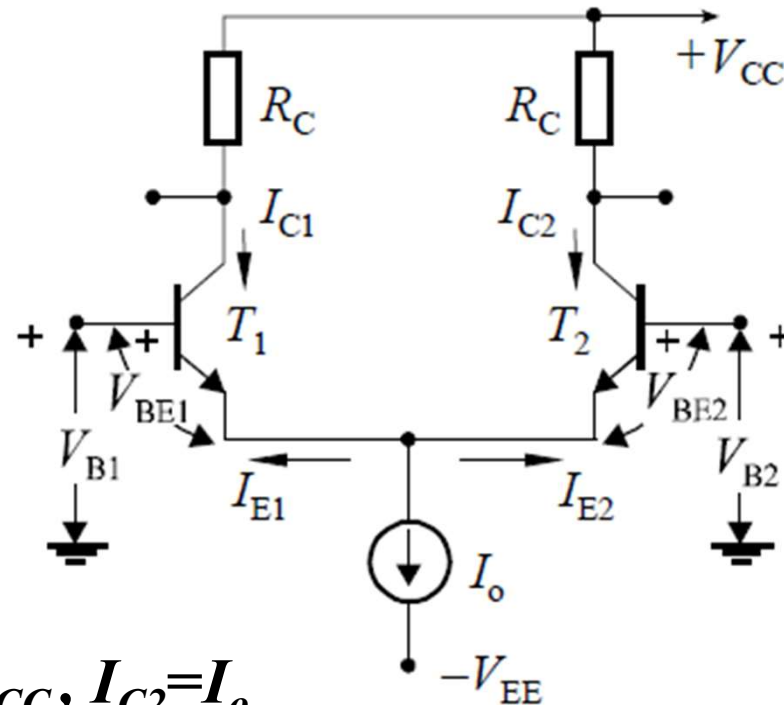
## Strujna

$$I_{C1} = f_1(V_{B1} - V_{B2})$$

$$I_{C2} = f_2(V_{B1} - V_{B2})$$

$$I_{E1} + I_{E2} = -I_o$$

$$I_{C1} + I_{C2} \approx I_o$$



$V_{BE1}$  menjamo:

$V_{BE1}$  malo, T1 zakočen  $\rightarrow V_{CE1} = V_{CC}, I_{C2} = I_o$

$V_{BE1}$  raste, T1 vodi  $\rightarrow I_{C1} \uparrow, V_{CE1} \downarrow; I_{C2} \downarrow, V_{CE2} \uparrow$

za veliko  $V_{BE1}, I_{C1max} = I_o, V_{CE1min} = V_{CC} - I_o R_C$

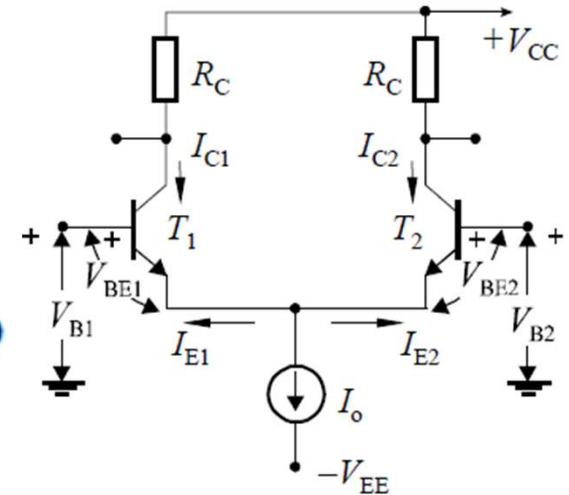
## Raspon (dinamika) izlaznog signala

$$\begin{aligned}(V_{iz})_{\max} &= (V_{C1} - V_{C2})_{\max} = \\ &= V_{CC} - (V_{CC} - R_C I_0) = R_C I_0\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}(V_{iz})_{\min} &= (V_{C1} - V_{C2})_{\min} = \\ &= (V_{CC} - R_C I_0) - V_{CC} = -R_C I_0\end{aligned}$$

$$\Delta V_{iz} = (V_{iz\max}) - (V_{iz\min}) = 2R_C I_0$$

**Raspon (dinamika) izlaznog signala proporcionalna  
sa  $R_C$  i  $I_0$ .**



Za one koji žele  
da nauče više

## Statička prenosna karakteristika BJT

### Raspon (dinamika) ulaznog signala?

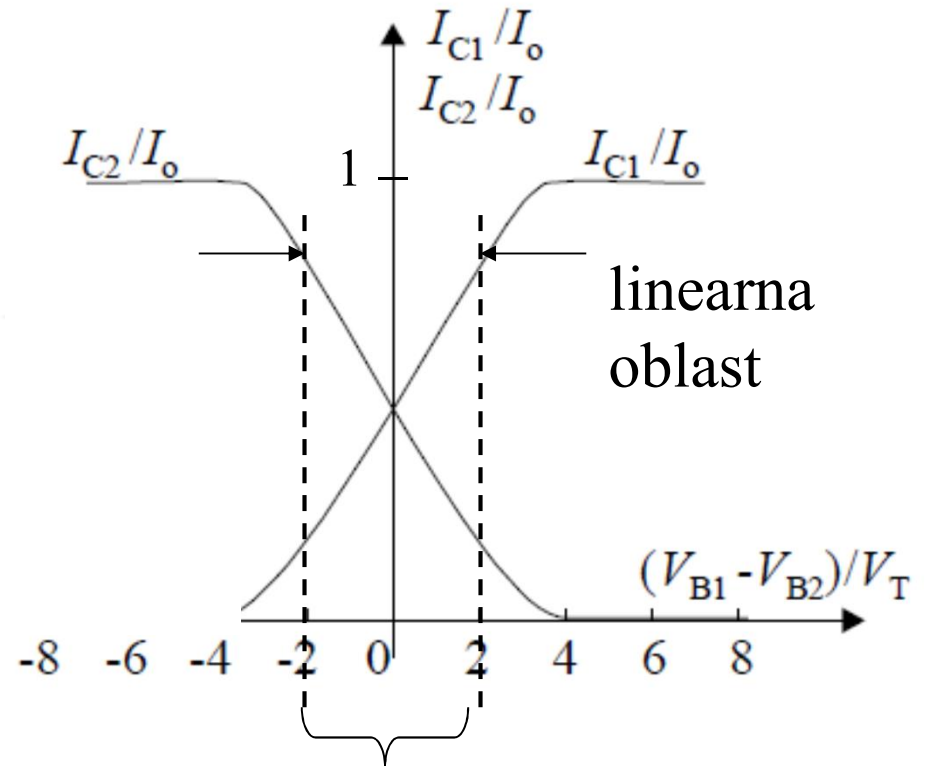
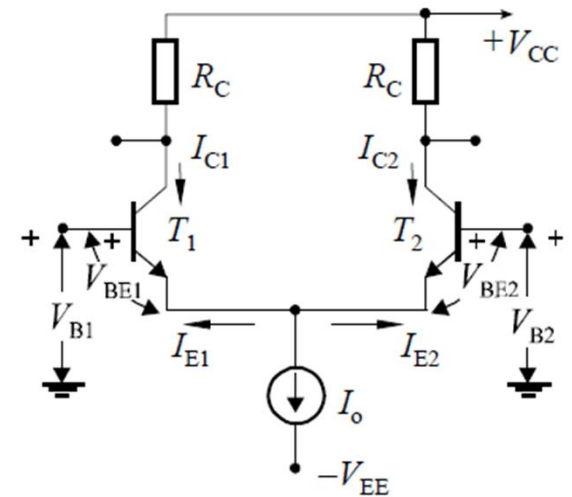
$$I_{E1} + I_{E2} = -I_O$$

$$V_{B1} - V_{B2} = V_{BE1} - V_{BE2}$$

$$-I_E = I_S e^{V_{BE}/V_T}$$

$$I_{C1} = -I_{E1} = \frac{I_O}{1 + e^{-(V_{B1} - V_{B2})/V_T}}$$

$$\Delta V_u = 4V_T \approx 100\text{mV}$$

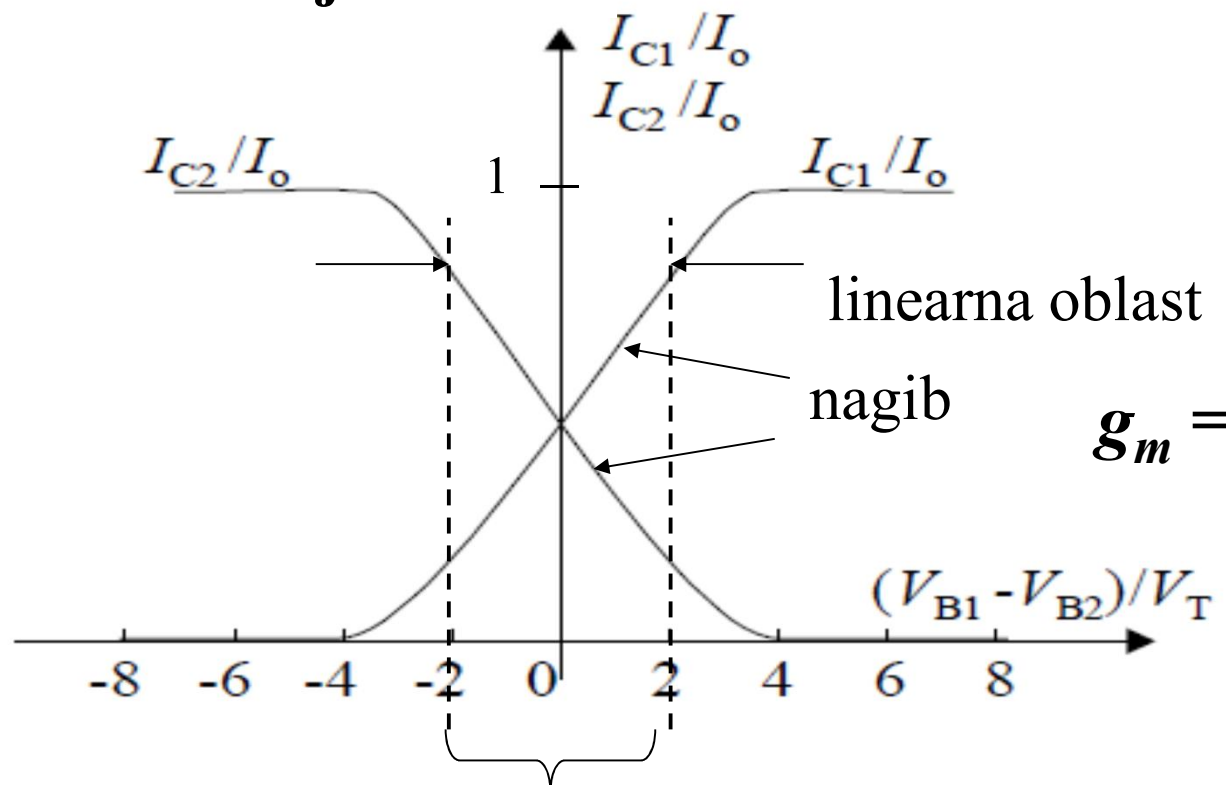




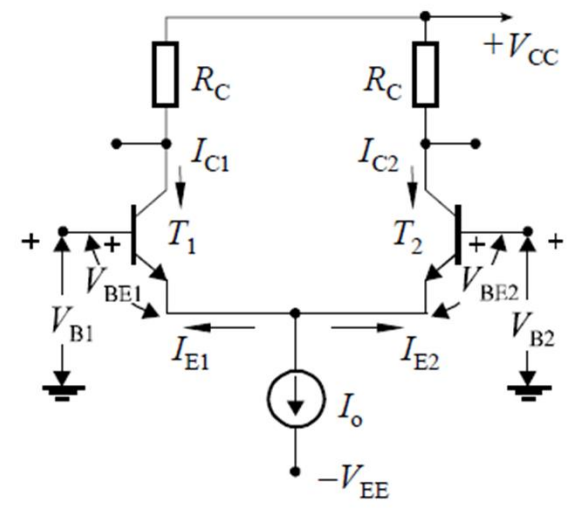
Za one koji žele  
da nauče više

# Strujna

## Statička prenosna karakteristika BJT



$$g_m = I_o / 4V_T$$



Pojačanje direktno zavisi od struje

$$I_o$$

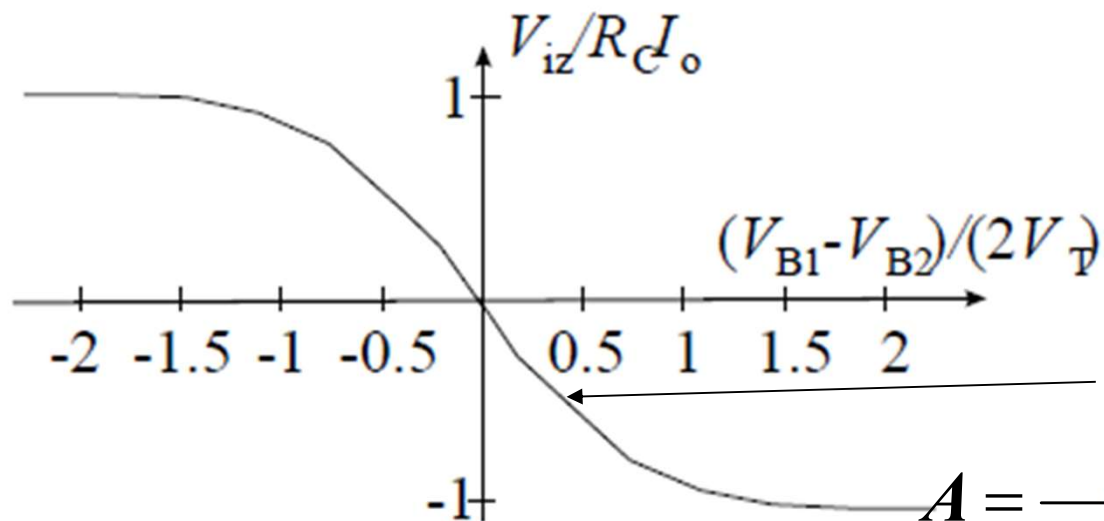
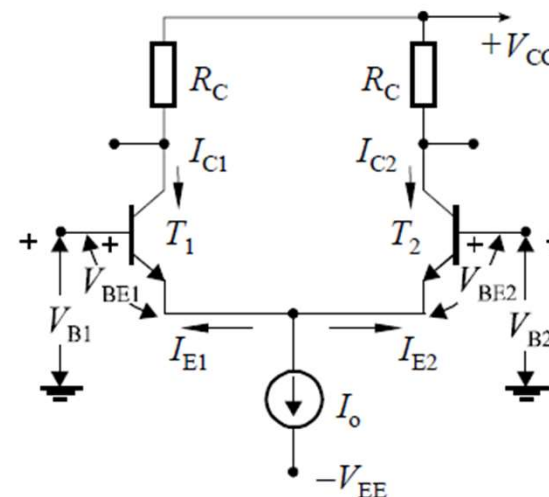
Veće  $I_o$ , veće pojačanje

Za one koji žele  
da nauče više

## Statička prenosna karakteristika BJT

### Naponska

$$\begin{aligned} V_{iz} &= V_{C1} - V_{C2} \\ &= (V_{CC} - R_C I_{C1}) - (V_{CC} - R_C I_{C2}) \\ &= R_C (I_{C2} - I_{C1}) \end{aligned}$$

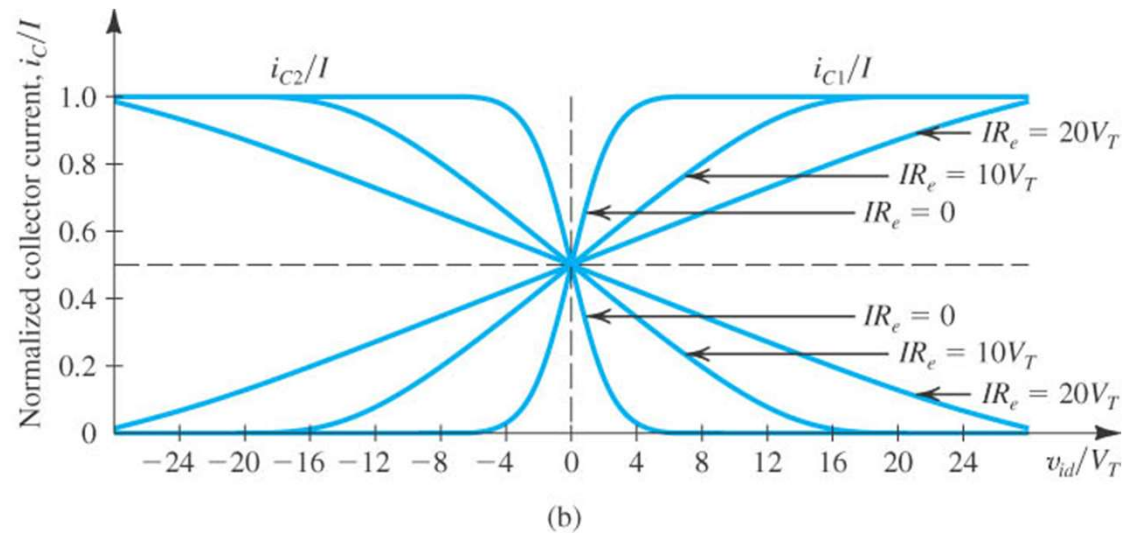
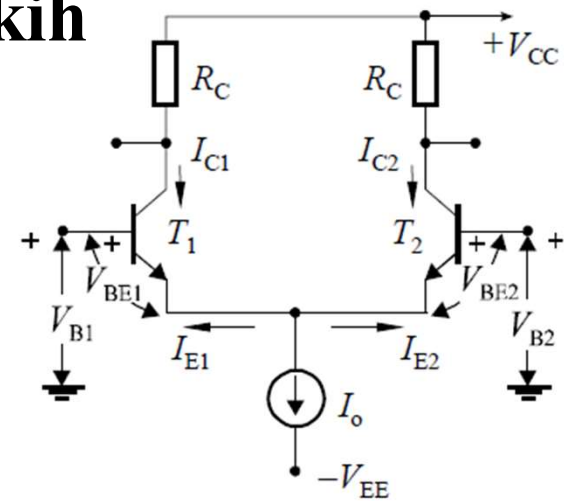
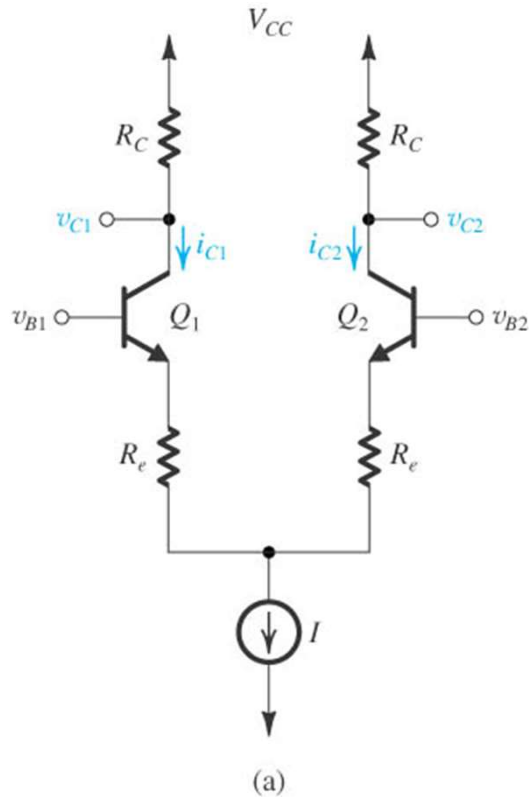


nagib

$$A = \left. \frac{\partial V_{iz}}{\partial (V_{B1} - V_{B2})} \right|_{V_{B1} = V_{B2}}$$

$$A = 2R_C \left( \frac{I_o}{4V_T} \right) = -2R_C \cdot g_{md}$$

**Povećanje dinamičkog opsega ulaznog napona postiže se ugradnjom emitorskih otpornika u oba tranzistora (*negativna povratna sprega*)**

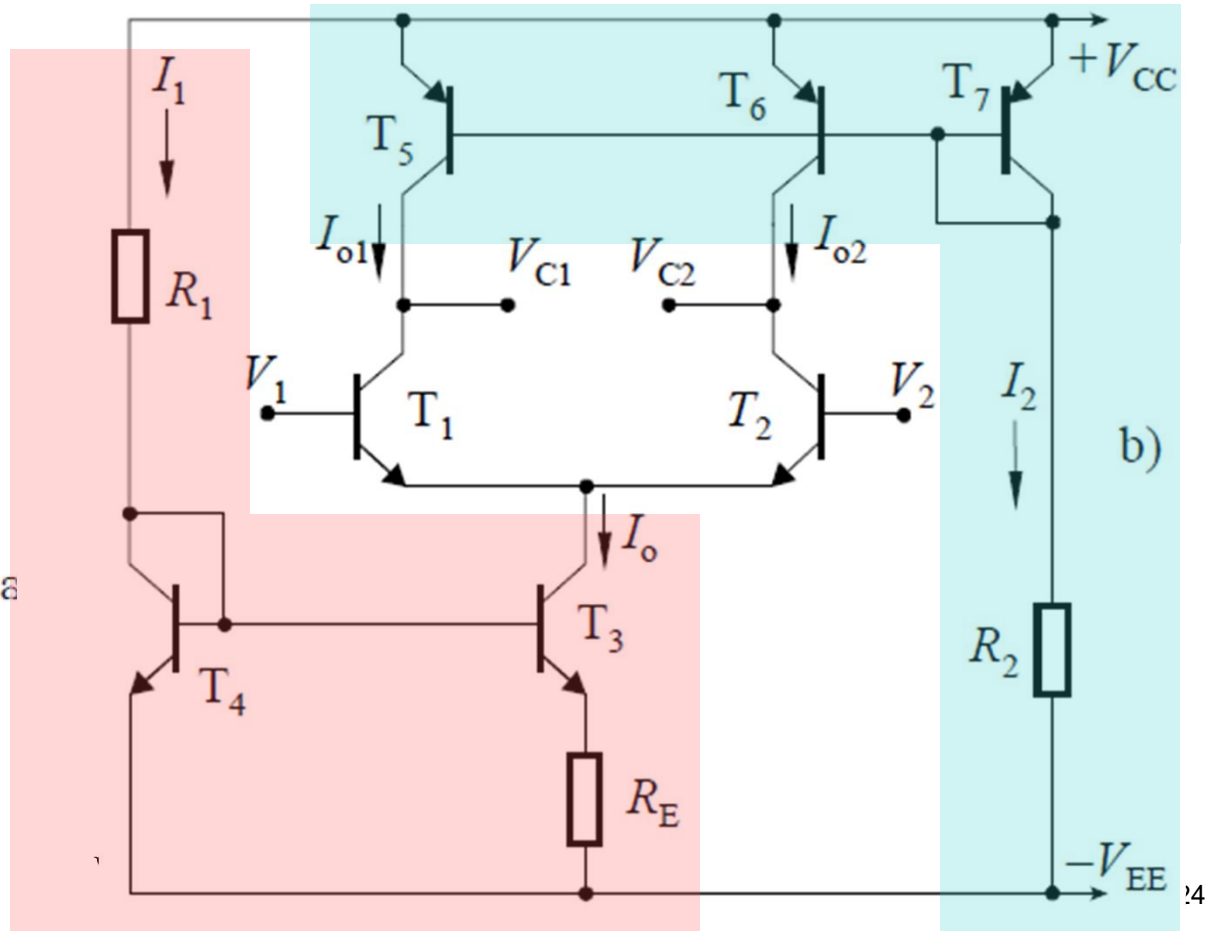
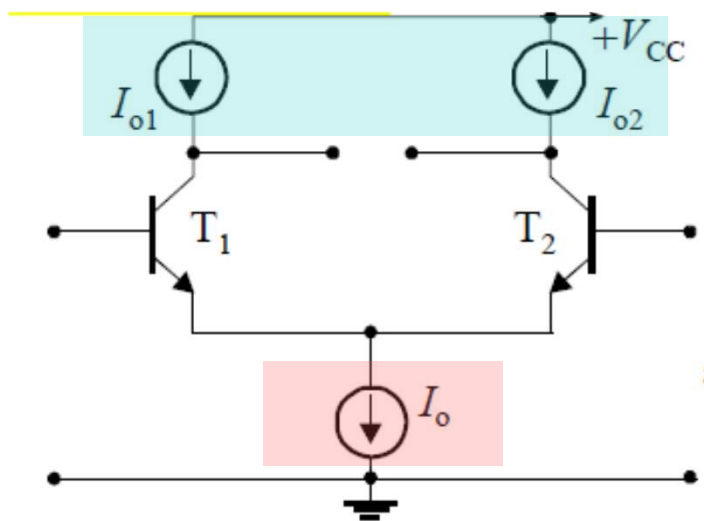


# Diferencijalni pojačavači

## Poboljšanje performansi

Veće pojačanje zahteva veće  $R_C$  ( $R_D$ )

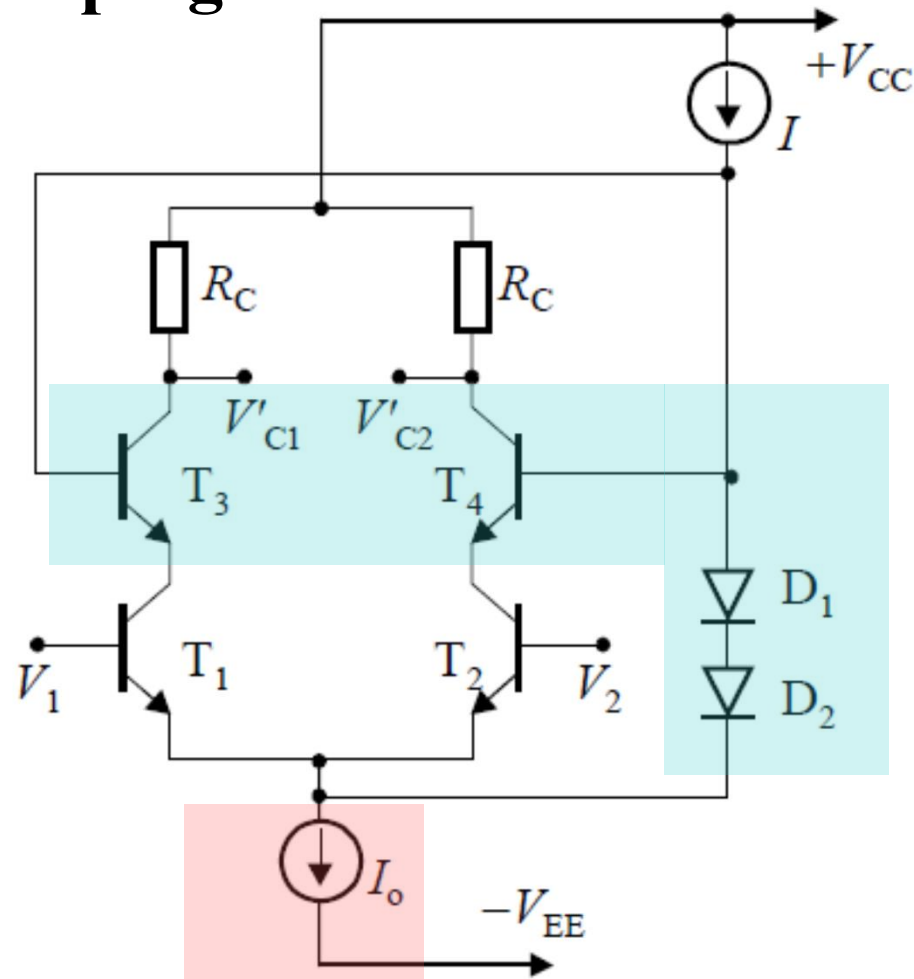
Rešenje – strujni generatori kao dinamičko opterećenje



27. novembar 2018.

# Veće pojačanje – bolji osnovni pojačavači

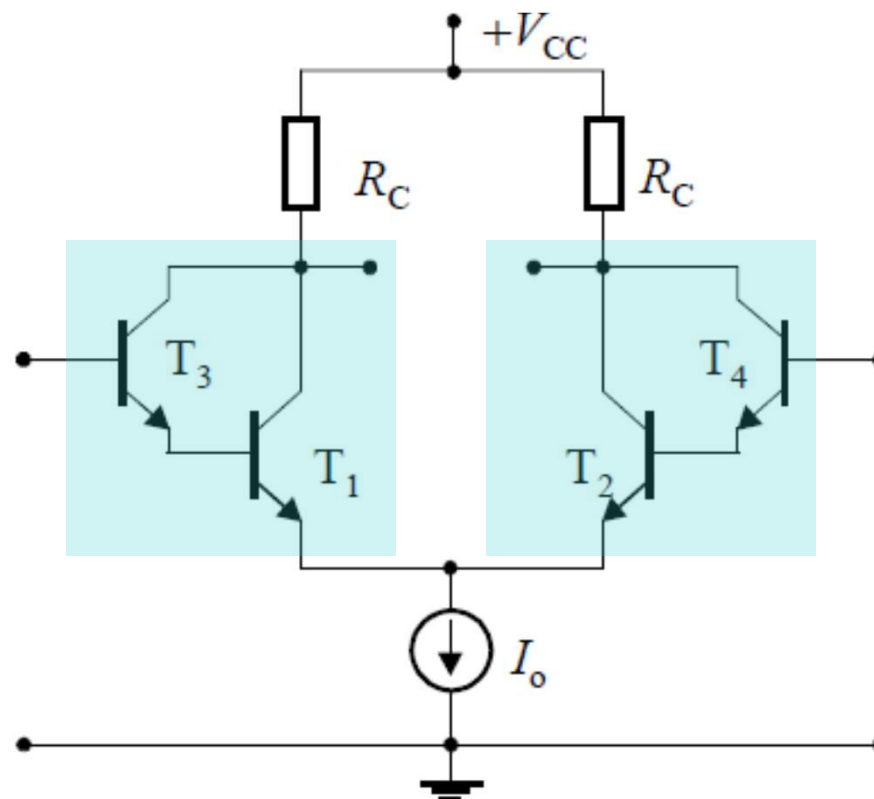
## Rešenje – kaskodna sprega



**Veće pojačanje – tranzistori sa većim  $\beta$**

**Veća ulazna otpornost**

**Rešenje – Darlingtonov par**

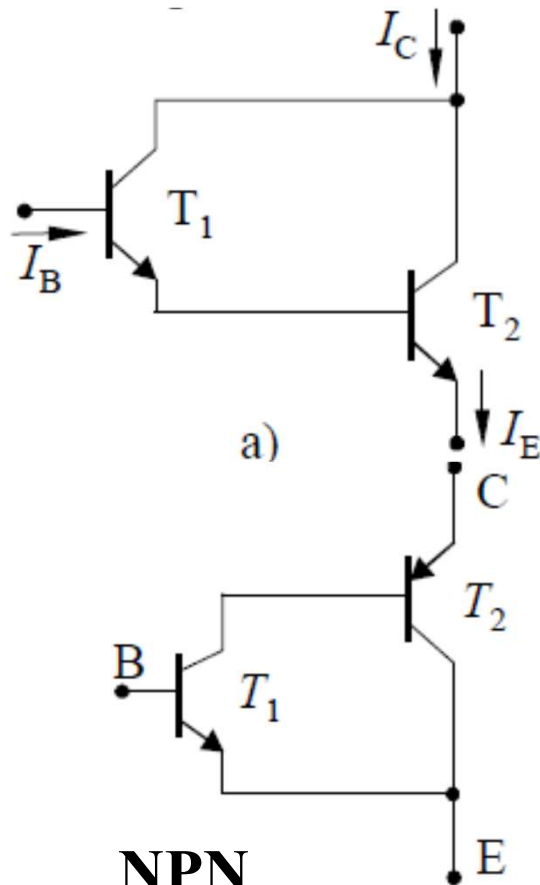


## Direktna sprega

Direktnom spregom može da se postigne veće  $\beta$  i veća ulazna otpornost tranzistora

*Darlingtonova sprega*

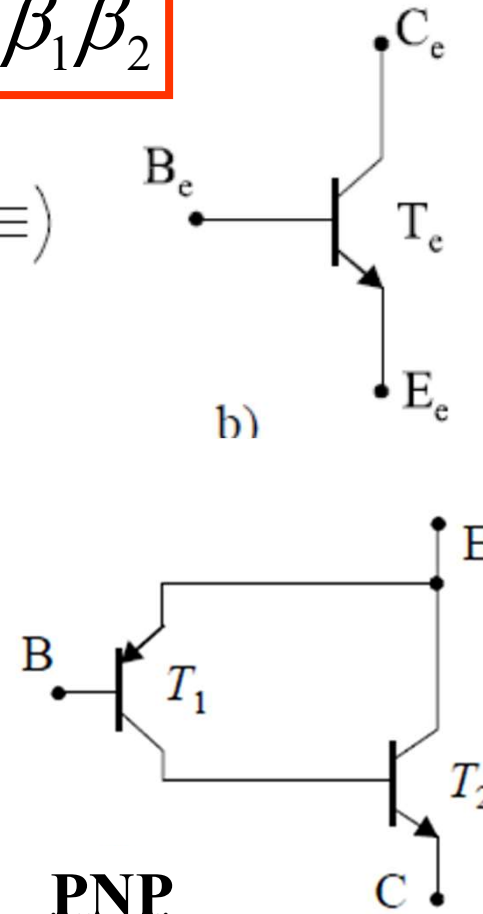
$$\beta_e = \beta_1 \beta_2$$



**NPN**

27. novembar 2018.

( $\equiv$ )

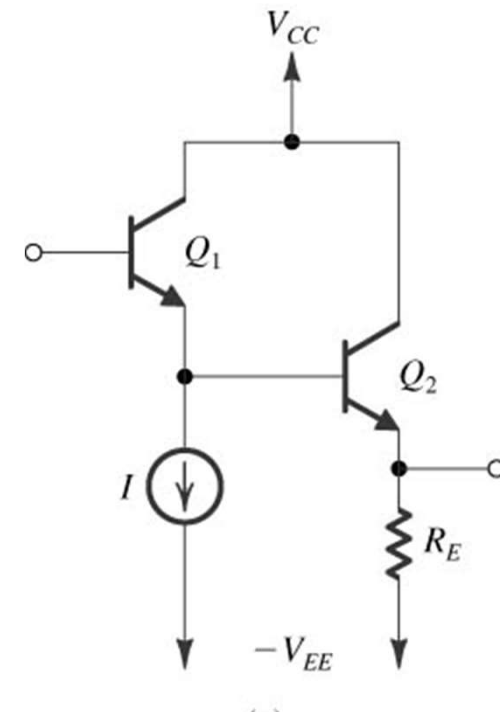
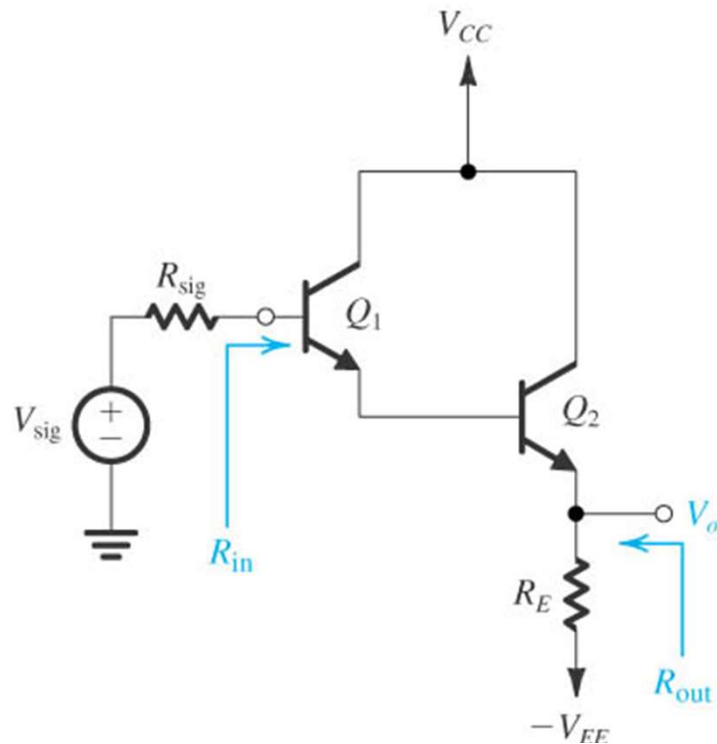


**PNP**

Višestepeni pojačavači

## Direktna sprega

### Darlingtonova sprega



### ZC-ZC veza

Velika ulazna, mala  
izlazna otpornost

$I$  obezbeđuje da  $Q_1$  radi  
u oblasti sa velikim  $\beta$



## Strujni ofset

Usled nesavršenosti proizvodnje, diferencijalni par imaće različito  $\beta$ .

Zato će se razlikovati  $I_C$  čak i kada su  $I_B$  iste.

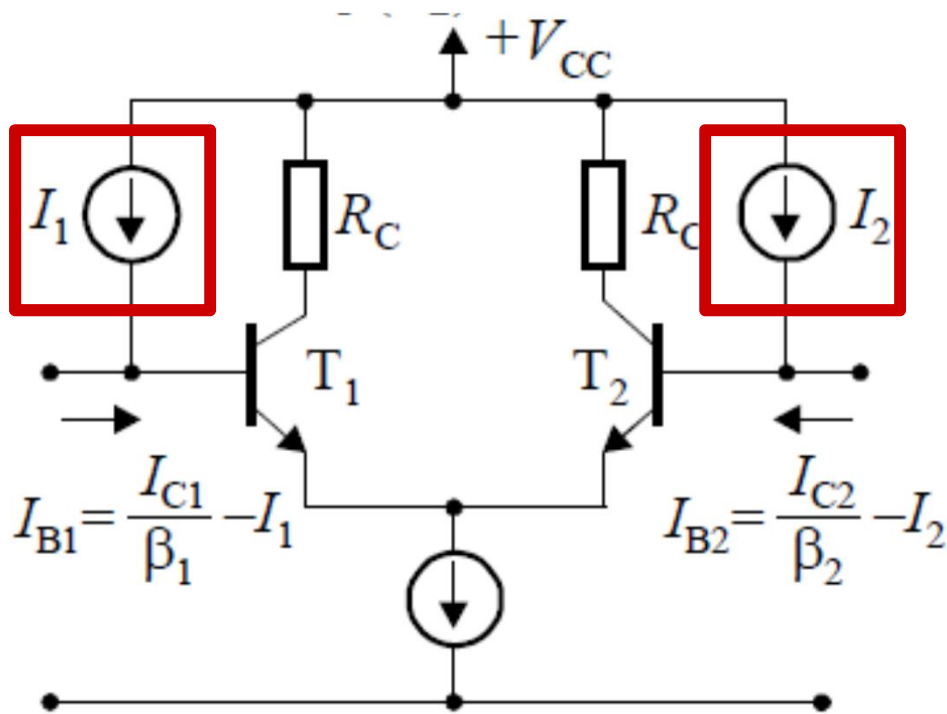
$$\begin{aligned} I_{OS} &= I_{B1} - I_{B2} = \\ &= \left( \frac{I_{C1}}{\beta_1} - I_1 \right) - \left( \frac{I_{C2}}{\beta_2} - I_2 \right) \end{aligned}$$

Tipična vrednost strujnog ofseta iznosi 10% nominalne vrednosti struje baze.

I zbog toga je potrebno da  $I_B$  budu male (znači:  $R_u$  veliko, tranzistori sa velikim  $\beta$ )

$I_{OS}$  zavisi od temperature

## Kompensacija strujnog ofseta



$$I_{OS} = I_{B1} - I_{B2} =$$

$$= \left( \frac{I_{C1}}{\beta_1} - I_1 \right) - \left( \frac{I_{C2}}{\beta_2} - I_2 \right)$$